

Nivelamento submicrométrico automático de um veio em rotação por autocolimação

David Araújo Pereira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida

Orientador no OAUP: Engenheiro Bernardo Carneiro Leão Relvas



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Automação**

Junho de 2017

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo descrever o trabalho realizado para o nivelamento submicrométrico automático do Círculo Meridiano de Espelho presente no Observatório Astronómico da UP. Além de serem explicadas as diferentes áreas e etapas para o desenvolvimento deste trabalho, é dado um enquadramento do funcionamento do Círculo Meridiano. Este instrumento científico roda segundo um eixo paralelo ao eixo Este-Oeste e é utilizado para calcular a hora a partir da posição celeste das estrelas. Observa-se que, aquando a sua rotação, existe um desalinhamento do eixo, que foi corrigido, durante muitos anos, através de um sistema flutuante em mercúrio. Esta substância, devido à sua nocividade, foi retirada durante um restauro funcional do instrumento.

O trabalho descrito nesta Dissertação teve como objetivo a elaboração de um sistema eletromecânico automático, capaz de substituir o sistema de mercúrio no nivelamento do eixo, garantindo um nivelamento submicrométrico. Para tal, foram utilizados dois motores passo-a-passo que, com base na informação recolhida por um algoritmo de processamento de imagem desenvolvido, atuam verticalmente no eixo do Círculo Meridiano.

Os resultados dos testes efetuados foram extremamente satisfatórios, na medida em que se cumpriu o objetivo: o sistema eletromecânico desenvolvido permite obter, de forma automática, um erro submicrométrico; mais precisamente, um erro máximo de 0.5 micrómetros. Este nivelamento permite a obtenção de resultados de medição da hora com maior precisão e sensibilidade.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Automatic submicrometric levelling of a rotating shaft by autocollimation

The goal of this thesis is to describe the work developed in order to achieve an automatic submicron levelling of a Mirror Transit Circle instrument, present at the Astronomical Observatory of Porto University.

Several areas and steps, in the development of this work, are here discriminated. Furthermore, an introduction on how the Mirror Transit Circle works has also been included.

This scientific instrument rotates along an axis, parallel to the East-West axis, and it is used to calculate local time based on the celestial position of the stars. It has been noted that, during the rotation of the instrument, there is a misalignment of the central axis. To solve this problem, a system based on floating mercury was used. This substance, due to its toxicity, was removed during a functional restauration of the instrument.

The work that is here described, had as main objective the development of an automatic electromechanical system, capable of replacing the mercury system in the levelling of the axis, thus assuring a submicron levelling. In order to do so, two stepper motors were used, which act vertically on the axis of the Mirror Transit Circle, based on the information given by an image processing algorithm, that was developed during this work.

The results of the tests were extremely positive, since the main goal was, in fact, accomplished: the developed electromechanical system allows, in an automatic way, to obtain the levelling of the instrument, with a submicron error. More precisely, it allows a maximum error of 0.5 micron. Such levelling allows for a more accurate calculation of local time, with higher precision and sensibility.

À minha família

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Engenheiro Bernardo Carneiro Leão Relvas e ao Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida. Ao Engenheiro Bernardo agradeço a enorme ajuda para realizar a parte prática deste trabalho, assim como a disponibilidade e paciência. Ao Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida agradeço a ajuda indispensável na escrita desta dissertação, a disponibilidade e interesse no tema. A ambos agradeço os ensinamentos partilhados comigo.

Gostaria também de agradecer ao Engenheiro Pedro Cruz pela ajuda essencial na componente elétrica deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha família, pelo apoio incondicional, não apenas na realização deste trabalho, mas em todo o meu percurso profissional e pessoal. Aos meus pais, além do tempo despendido para ler a tese, agradeço a confiança que sempre depositaram em mim. À minha avó agradeço pelo enorme carinho, e à minha irmã pela paciência incansável.

Agradeço também aos meus amigos, por me lembrarem que existe sempre tempo para celebrar a amizade. À Sónia, agradeço pela sua compreensão, apoio e carinho.

Finalmente, gostaria de agradecer a todas pessoas do Observatório Astronómico, por estarem disponíveis para me ajudar, em qualquer questão pontual.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Índice de Conteúdos

RESUMO	III
AUTOMATIC SUBMICROMETRIC LEVELLING OF A ROTATING SHAFT BY AUTOCOLLIMATION	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.2 CONCEITOS ASTROFÍSICOS	3
1.2.1 SISTEMA ALTITUDE-AZIMUTE	3
1.2.2 SISTEMA EQUATORIAL CELESTE	4
1.3 CÍRCULO MERIDIANO DO OBSERVATÓRIO ASTRONÓMICO DO PORTO	5
1.3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	5
1.3.2 FUNCIONAMENTO DO CÍRCULO MERIDIANO DO OAUP	7
1.3.3 ESPELHO E CONJUNTO DE EQUILIBRAGEM	10
1.3.4 OBSERVAÇÃO DAS ESTRELAS	13
1.3.5 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DA HORA	15
1.3.6 SISTEMA DE NIVELAMENTO POR VASOS COMUNICANTES DE MERCÚRIO	17
1.4 NOVO SISTEMA DE NIVELAMENTO	20
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2. DETECÇÃO DE PEQUENAS INCLINAÇÕES ANGULARES	23
2.1 INTERFEROMETRIA	24
2.1.1 PADRÃO DE MOIRÉ	24
2.1.2 EFEITO DE TALBOT	25
2.1.3 MEDIÇÃO DE PEQUENAS INCLINAÇÕES ANGULARES USANDO A INTERFEROMETRIA DE LAU	26
2.2 AUTOCOLIMAÇÃO	32
2.2.1 PRINCÍPIOS DO AUTOCOLIMADOR	32
2.2.2 NIVELAMENTO DO C.M.E. NA DIREÇÃO ESTE-OESTE	35
2.3 COMPARAÇÃO ENTRE INTERFEROMETRIA E AUTOCOLIMAÇÃO	36
3. DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA DE NIVELAMENTO	37
3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA	38
3.2 CÁLCULO DO BINÁRIO NECESSÁRIO	38
3.3 SISTEMA ELETROMECHANICO	43
3.3.1 DISPOSIÇÃO DO SISTEMA	43
3.3.2 COMPONENTES	44
1) SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO	44
2) PC	48
3) DRIVES E FONTE DE ALIMENTAÇÃO	49
4) AUTOCOLIMADOR DIGITAL	49
5) ENCODER DE LIGAÇÃO DE SISTEMAS	52
3.3.2 LIGAÇÕES ELÉTRICAS	53
3.3.3 LIGAÇÃO DRIVE-MOTOR (LIGAÇÃO 6 E 7)	54
3.3.2 LIGAÇÃO DRIVE-ENCODER (LIGAÇÃO 8 E 9)	55
3.3.3 LIGAÇÃO PC- DRIVES (LIGAÇÃO 3)	55
3.3.4 LIGAÇÃO CÂMARA- PC (LIGAÇÃO 1)	56
4. PROCESSAMENTO DE IMAGEM	57
4.1 INTRODUÇÃO	58

4.2 MULTI-OBJECT TRACKING (MOT) EM MATLAB®	59
4.3 MÓDULOS DO ALGORITMO	59
4.3.1 AQUISIÇÃO DE VÍDEO	59
4.3.2 BLOB ANALYSIS	60
4.3.3 TRANSFORMAÇÃO DE COR PARA ESCALA DE CINZA	61
4.3.4 REDUÇÃO DE RUÍDO DA IMAGEM	61
4.4 DETERMINAÇÃO DO ERRO MÁXIMO PERMITIDO	61
5. COMUNICAÇÃO SÉRIE COM OS CONTROLADORES	63
5.1 COMANDOS	63
5.2 INTEGRAÇÃO COM O MATLAB®	65
6.FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO EM MATLAB®	67
6.1 INTERLIGAÇÃO ENTRE O PROCESSAMENTO DE IMAGEM E O CONTROLO DOS MOTORES	67
6.2 GRAFCET	68
7. TESTES E RESULTADOS	71
7.1 ANÁLISE DO PROGRAMA DE NIVELAMENTO	71
7.2 COMPORTAMENTO DO FEIXE REFLETIDO DURANTE A ROTAÇÃO DO CÍRCULO MERIDIANO	72
7.3 DISTÂNCIA ENTRE OS DOIS FEIXES DE LASER NO EIXO HORIZONTAL	74
7.4 CONCLUSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS	76
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
8.1 CONCLUSÕES	77
8.2 TRABALHOS FUTUROS	79
9. REFERÊNCIAS	81
ANEXO A1- LIGAÇÃO RS485-USB	84
ANEXO A2- “DATA SHEET” DO MOTOR PASSO-A-PASSO UTILIZADO	85
ANEXO A3- “DATA SHEET” DA DRIVE UTILIZADA	87
ANEXO A4- PROGRAMA DE NIVELAMENTO DO C.M.E.	87

Acrónimos e Abreviaturas

C.M.E.	-	Círculo Meridiano de Espelho
OAUP	-	Observatório Astronómico da Universidade do Porto
NCL	-	North Celestial Pole
SCP	-	South Celestial Pole
SW	-	SolidWorks
CCD	-	Charged Couple Device
CMOS	-	Complementary metal-oxide-semiconductor
MOT	-	Multi-Object Tracking

Índice de Figuras

Figura 1- Representação do sistema de altitude-azimuth relativamente a um observador [5]. É possível destacar o ponto Zênite(Zenith), Nadir e o Meridiano local, que passa entre o Nadir e o Zênite [3]	3
Figura 2- Sistema de Coordenadas Equatorial. A Ascensão reta (a azul) é representada por α e a declinação (a vermelho) por δ [3]. <i>NCP</i> refere-se ao polo Norte Celestial e <i>SCP</i> ao polo Sul celestial.....	4
Figura 3- Círculo Meridiano da Universidade de Coimbra.....	5
Figura 4- Círculo Meridiano de Espelho UP em 1967 [34]	6
Figura 5- Casa do Círculo Meridiano em 1957 [1]	6
Figura 6- Eixo central do C.M.E., os postos de observação Norte e Sul, e o relógio indicador da hora sideral.....	8
Figura 7- A roda do Eixo central do C.M.E. e pinhão responsável por transmitir a rotação desejada foram construídos de forma a terem uma pequena altura de dente, para minimizar o escorregamento entre dentes	9
Figura 8- Espelho central e o seu mecanismo de equilíbrio em 1967 [1]. Na extremidade do eixo, o munhão indicado assenta no seu suporte	11
Figura 9- As irregularidades dos munhões(L_m) podem ser observadas comparando os valores observados com os calculados [1]	11
Figura 10- Modelo SolidWorks do conjunto de equilibragem atual do Espelho do Círculo Meridiano.....	12
Figura 11- Posto de Observação Sul [1]. Da esquerda para a direita, os seguintes componentes estão representados: (A) Mecanismo de Desmultiplicação; (B) Comando do Espelho; (C) Micrómetro Registador; (D) Unidade de Processamento.....	13
Figura 12- Versão do micrómetro registador com o carril que permite o seu movimento horizontal.....	14
Figura 13- Comando do Espelho do C.M.E, onde é inserido o ângulo para qual o eixo do C.M.E. deve rodar. Este ajuste angular é feito a partir de dois botões: o da esquerda com grande sensibilidade (para ajustamentos angulares grossos) e o da direita com uma pequena sensibilidade (para ajustes angulares finos).....	16
Figura 14- Relógio presente na sala do C.M.E., indicador da hora GMT.....	16
Figura 15- Copos alimentadores de mercúrio e respetivos Pistões do C.M.E.	18
Figura 16- “ Novo Eixo do Círculo Meridiano” Desenho de conjunto do C.M.E., número 3001 do Observatório Astronómico da UP, realizado em 1965 [35]. Na lista peças, salienta-se o “Dispositivo para Apoio do Eixo”, “As munhoneiras”, a “Base” e o “Dispositivo de Impulso do Mercúrio	18
Figura 17- Motor de Eixo, utilizado para realizar um movimento vertical no eixo do C.M.E., perpendicular ao eixo Este-Oeste	19
Figura 18- (a) Padrão de linhas retas. (b) Padrão Moiré entre linhas retas da mesma espessura, desviadas de um ângulo α entre si [36]	24
Figura 19- Efeito de Talbot para uma luz monocromática [37]	25

Figura 20- A distância entre uma fração do retículo G_1 e várias frações do retículo G_2 difere por múltiplos de λ , se os dois retículos se encontrarem a uma distância de $Z = md2/\lambda$ [10]	26
Figura 21- Diagrama esquemático representativo da medição de pequenas inclinações angulares utilizando a Interferometria de fase de Lau [8]	27
Figura 22- Diagrama esquemático de uma simulação real de medição de pequenas inclinações usando a interferometria de Lau [8]	29
Figura 23- Franjas de Moiré obtidas, após melhoramento de imagem, para (a) $\alpha_1 = 13.7^\circ$ e (b) $\alpha_2 = 21.9^\circ$ [8]	30
Figura 24- Curvas teóricas representativas entre o ângulo δ da superfície do objeto e o ângulo α das franjas de Moiré, para diferentes valores de ângulo cruzado θ [8]	31
Figura 25- Princípio de um autocolimador [12]	32
Figura 26- Autocolimador com inspeção visual [11]	33
Figura 27- Autocolimador Digital [11]	34
Figura 28- Nivelamento horizontal do Autocolimador Digital com a direção Este-Oeste. Os dois parafusos de ajuste vertical (um em cima e outro em baixo) são apertados/desapertados consoante a leitura do nível de bolha	35
Figura 29- Representação do Sistema de Controlo	38
Figura 30- Parafuso de rosca quadrada, sujeito a uma força F axial de compressão [15]	39
Figura 31- Diagramas de força. (a) Elevação da carga; (b) Descida da carga [15]; λ é o ângulo de avanço	39
Figura 32- Coeficiente de Atrito para Roscas [15]	42
Figura 33- O Motor 2 assegura o engrenamento da roda do Eixo Central. O Motor 1 é responsável pelo nivelamento submicrométrico.	43
Figura 34- Sistema de Transmissão do novo sistema de nivelamento do C.M.E.	44
Figura 35- Modelo SW do sistema de Transmissão de rotação em Translação Linear. A -Motor passo-a-passo; B -Redutor 8:1; C - Placa portadora de um MicroSwitch; D - Castanha mecânica	45
Figura 36- Modelo SW do Corte do Sistema de Transmissão representado na Figura 33. 1 - Parafuso e Anilha de aperto; 2 -Casquilho; 3 -Fuso; 4 -Rolamento de esferas; 5 - Acoplamento do conjunto Motor e Redutor + Fuso; 6 - Suporte da munhoneira, em ferro fundido.	45
Figura 37- Contacto entre castanha e munhoneira	46
Figura 38- (1)- Parafuso de Aperto; (2) - Fuso; (3) -Castanha mecânica	46
Figura 39- Motor Passo-a-Passo ST8918M6708-A [18]	48
Figura 40- Curva Binário-Velocidade do motor utilizado. A curva azul (4.76A 24V series) é respetiva aos motores passo-a-passo utilizados [18]	48
Figura 41- Drive SMCI47-S2	49
Figura 42- Atribuição do module address da drive SMCI47- S2. No interruptor à esquerda, é atribuído o primeiro dígito, e no interruptor à direita o segundo dígito	49
Figura 43- Autocolimador Digital do C.M.E.	50

Figura 44- Pormenor dos dois feixes de laser, vistos na lamela ou no alvo original. O eixo de coordenadas encontra-se representado no canto superior esquerdo	51
Figura 45- Encoder responsável pelo feedback de rotação do eixo central do C.M.E.	52
Figura 46- Esquema das ligações entre os componentes do sistema de nivelamento	53
Figura 47- Esquema elétrico da ligação da drive ao Motor passo-a-passo ST8918M6708-A ..	54
Figura 48- Esquema elétrico da ligação do motor à drive SMCI47-S (não é especificado se é a Drive S2 ou S3, uma vez que a ligação é igual) [20]	55
Figura 49- Atribuição dos Pins do Cabo ZK-RS485-USB [20]	55
Figura 50- Atribuição dos Pins do cabo G3-AIOC-BLUNT2M [24]	56
Figura 51- Detecção de dois pontos e cálculo da sua distância no eixo y, através do algoritmo desenvolvido neste trabalho.....	57
Figura 52- Bloco Blob Analysis da secção de visionstatistics do MATLAB® com algumas propriedades que permite avaliar	60
Figura 53- Esquema das tarefas a efetuar para estabelecer uma comunicação série no MATLAB®. Em cada tarefa está escrito o comando para a efetuar	65
Figura 54- Interligação entre o Processamento de Imagem e o Controlo de Motores. A variável “dy” representa a distância entre os dois feixes de laser	68
Figura 55- Grafcet representativo do programa desenvolvido no MATLAB® para o nivelamento do Círculo Meridiano de Espelho	69
Figura 56- Distância entre os dois feixes, quando detetados pelo sistema de nivelamento	71
Figura 57- Distância entre o feixe emitido e refletido, durante uma rotação completa do eixo do C.M.E., sem intervenção do sistema de nivelamento	72
Figura 58- Distância entre o feixe de laser emitido e refletido, durante uma rotação do eixo do C.M.E., com intervenção do sistema de nivelamento	73
Figura 59- Nivelamento submicrométrico. Aos 2 segundos, a distância entre os dois feixes é de aproximadamente 0,035 pixel, que corresponde a 0,261 μm	74
Figura 60- Distância entre os dois feixes de laser, no eixo horizontal, durante uma rotação de 360° do Círculo Meridiano	74

Índice de Tabelas

Tabela 1- Comandos principais para estabelecer uma comunicação série com a drive SMCI47-S2.....	64
--	----

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

1. Introdução

“Um Círculo Meridiano é um instrumento de concepção inicialmente muito simples, de construção difícil, e de funcionamento que não corresponde à simplicidade da sua concepção inicial” [1]

Um C.M.E. é um instrumento científico usado para calcular a hora. Do ponto de vista teórico, o seu funcionamento baseia-se no princípio de que a hora sideral corresponde à ascensão reta da estrela, na sua passagem pelo meridiano local. Do ponto de vista prático, a determinação da hora é conseguida através da observação da passagem de uma estrela num espelho. Por reflexão, a luz da estrela é captada pelo observador, por intermédio de uma luneta, capaz de colimar o feixe luminoso.

Este trabalho decorreu no Observatório Astronómico “Professor Manuel de Barros”, da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. O Observatório foi inaugurado em 1948 e adotou o nome do seu fundador (Professor Manuel Pereira de Barros), docente de Astronomia e Geodesia na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Localiza-se em Vila Nova de Gaia, no Monte da Virgem, e foi reconhecido em 1943 como um local propício à observação de corpos celestes. Desde a sua inauguração, o Observatório tem-se dedicado ao desenvolvimento de atividades de investigação e ensino nas áreas das Ciências da Terra, do Espaço e da Engenharia Geográfica. Paralelamente, protagoniza um papel importante ao nível da formação e divulgação científica junto da população, traduzido na aproximação às escolas do Ensino Básico e Secundário do Grande Porto.

Este trabalho teve como objetivo o nivelamento automático submicrométrico de um veio longo em rotação, substituindo o mecanismo presente, por um sistema automático.

Para observar diferentes estrelas, o espelho central do C.M.E. roda em torno de um eixo horizontal alinhado na direção Este-Oeste. O alinhamento do espelho em rotação é um aspeto fulcral na utilização deste tipo de instrumentos, uma vez que, qualquer desvio angular, gera erros na determinação da hora. Originalmente, o posicionamento do espelho em relação ao eixo que o transporta em rotação era conseguido através de um sistema de parafusos micrométricos e molas de compressão que, idealmente, o imobilizariam. Porém, através da utilização de um microindicador, concluiu-se que a posição do espelho não era invariável em rotação.

Inicialmente foram conseguidos resultados de tempo ao centésimo de segundo nas medições efetuadas, utilizando um sistema hidráulico à base de mercúrio, que garantia a horizontalidade do instrumento. Este sistema hidráulico, com base no princípio dos vasos comunicantes, alinhava o sistema que transporta o espelho, além de garantir o engrenamento perfeito da motorização do eixo. Contudo, não era capaz de colmatar os erros originados pelo desalinhamento entre o espelho e o seu suporte, sendo necessário um ajuste manual micrométrico diretamente no espelho, apertando um conjunto de parafusos micrométricos de posicionamento.

Por se considerar um fluido altamente nocivo, o mercúrio foi retirado durante o processo de restauro funcional do qual o C.M.E. foi alvo, entre 2010 e 2013, prevendo-se que pudesse ser recriado um sistema mais tarde.

Dadas as dificuldades acima retratadas, procurou-se desenhar um sistema eletromecânico composto por dois atuadores paralelos que atuassem no eixo, segundo o desvio lido num autocolimador. Uma vez que se estava a proceder à substituição do sistema baseado em mercúrio, pretendia-se desenhar uma solução que fosse capaz de garantir melhores resultados dos que este permitia, e, como tal, o objetivo seria o nivelamento direto do espelho central, em vez de nivelar apenas o sistema que transporta esse mesmo espelho. Assim, seria esperado diminuir o erro substancialmente, relativamente aos resultados obtidos com o sistema de mercúrio.

É esse o objeto deste trabalho: elaborar um sistema eletromecânico que, independentemente das flutuações do espelho em relação ao eixo, e da não-horizontalidade deste, tem como objetivo fazer coincidir o eixo de rotação abstrato do espelho com a direção produzida por uma fonte de luz colimada.

Para avaliar a qualidade desse nivelamento, o método de avaliação utilizado era o mais comum durante o século XX: a *autocolimação*, um procedimento ótico, de grande precisão, que utiliza um feixe de luz branca que permite detetar pequenos erros direcionais e de inclinação [2]. Este processo é realizado através de um autocolimador, objeto desenhado por André Danjon, diretor do Observatório de Paris.

No sistema atual do C.M.E., mantiveram-se os princípios de autocolimação utilizados, embora se tenha substituído o autocolimador antigo por um sistema mais atual, no qual é utilizado um feixe de laser, em vez de luz branca. Observa-se que, aquando da rotação do C.M.E., o feixe de laser refletido se encontra desfasado em relação ao feixe emitido de referência, indicando um desalinhamento do espelho central. De forma a garantir a horizontalidade do autocolimador, é utilizado um nível de bolha. Consoante a leitura feita no nível, utilizam-se quatro parafusos, para regular a inclinação. Assim, o feixe de laser emitido pelo autocolimador é, necessariamente, horizontal.

Em Setembro de 2016, o Observatório Astronómico propôs à FEUP a elaboração de um sistema controlado automaticamente com base em motores passo-a-passo e autocolimação digital, capaz de nivelar submicrometricamente a posição do espelho em rotação, tendo em conta a estética museológica do C.M.E.

1.2 Conceitos Astrofísicos

1.2.1 Sistema Altitude-Azimute

De forma a compreender o procedimento de medição da hora, existem conceitos essenciais à determinação da posição de um determinado objeto celestial. Na figura 1, encontra-se representado um sistema de altitude-azimute, na qual se localiza um ponto através da sua altitude e do seu azimute.

- **Altitude** é a distância angular acima do plano horizontal, segundo o círculo do meridiano local. É medida de 0 a 90° .
- **Azimute** é a distância angular a partir do polo Norte até à interseção entre o plano horizontal e vertical que passa pelo objeto.
- **Zênite** (*Zenith*) é o termo que designa o ponto interceptado por um eixo vertical traçado a partir de um observador até à esfera celeste.
- **Nadir** é o ponto localizado no mesmo diâmetro, mas no ponto oposto ao Zênite.
- **Meridiano** (*Meridian*) é o semicírculo que passa entre o Zênite e o Nadir, relativamente ao observador. Os ângulos de altitude são entre -90° e $+90^\circ$. Se o ângulo de um determinado objeto for negativo, este objeto encontra-se abaixo do horizonte do observador [3].

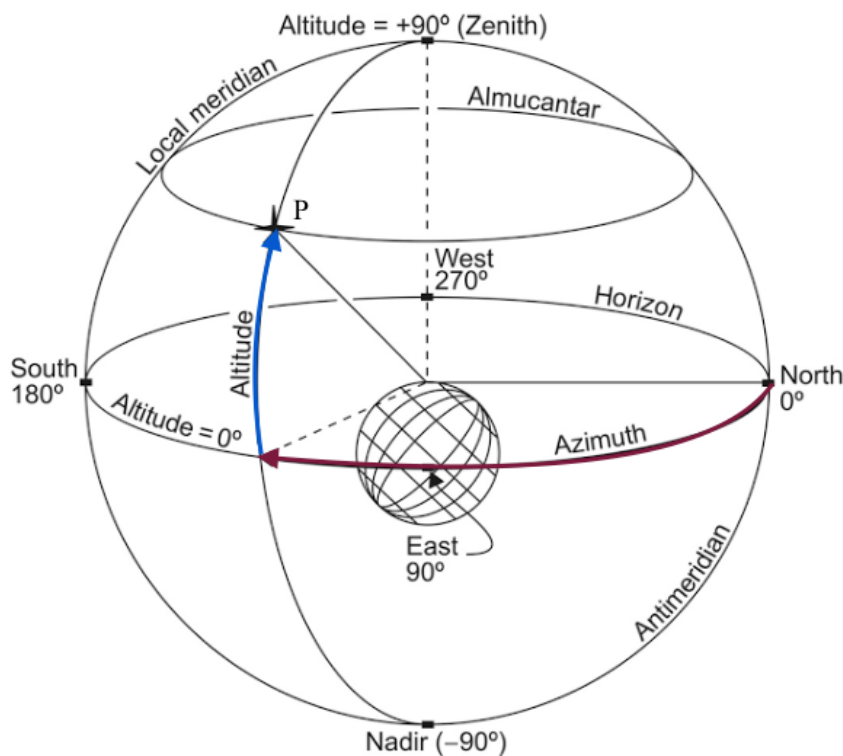


Figura 1- Representação do sistema de altitude-azimuth relativamente a um observador [5]. É possível destacar o ponto Zênite(Zenith), Nadir e o Meridiano local, que passa entre o Nadir e o Zênite [3]

1.2.2 Sistema Equatorial Celeste

Apesar de o sistema de altitude-azimute ser um sistema útil, as coordenadas variam muito rapidamente. Por este motivo, o sistema de coordenadas mais utilizado pelos astrónomos é o **Sistema de Coordenadas Equatorial**. Neste sistema, considera-se que a Terra se encontra inserida numa esfera celeste de raio considerável, na qual todos os objetos celestes estão presentes e rodam em torno da origem: a Terra. Considera-se que o raio da Terra é insignificante relativamente à esfera que a envolve. Este sistema encontra-se exposto na figura 2.

De forma a localizar objetos, utilizam-se duas coordenadas semelhantes à latitude e longitude: *Declinação* e *Ascensão reta*, respetivamente.

- (i) **Declinação(Declination- δ)**: A declinação é equivalente à latitude celestial, e é medida em graus, de -90° a $+90^\circ$, assumindo o valor nulo no equador celeste. Os objetos que se encontram acima do equador são representados com um sinal (+) e os que se encontram abaixo com um sinal (-).
- (ii) **Ascensão reta (Right Ascension- α)**: A ascensão reta é equivalente à longitude celestial, e é medida de Oeste para Este em horas, minutos e segundos, de 0h até 24horas. O tempo sideral é igual à ascensão reta de um corpo celeste quando ele interceta o meridiano local do observador.

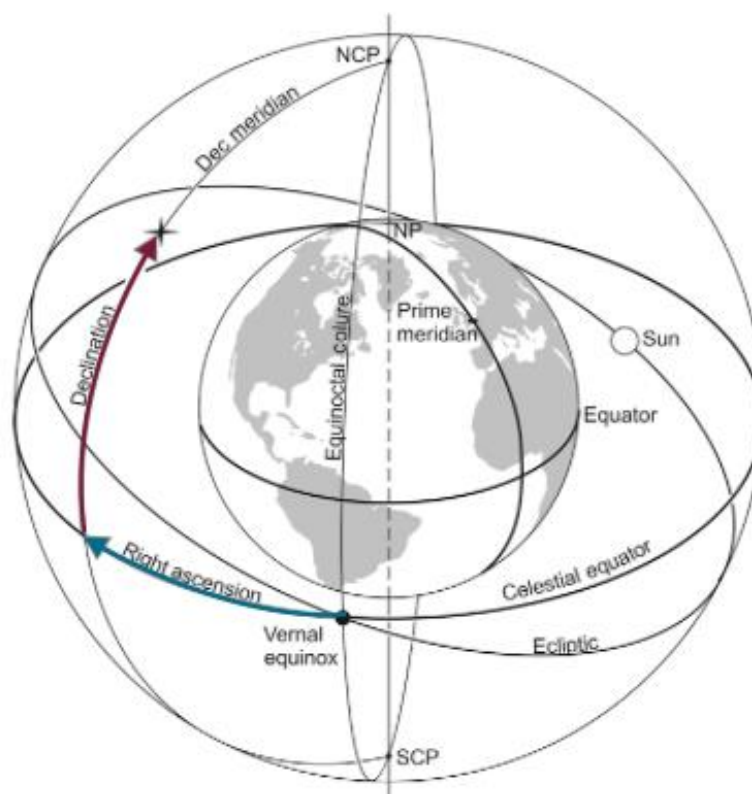


Figura 2- Sistema de Coordenadas Equatorial. A Ascensão reta (a azul) é representada por α e a declinação (a vermelho) por δ [3]. NCP refere-se ao polo Norte Celestial e SCP ao polo Sul celestial

1.3 Círculo Meridiano do Observatório Astronómico do Porto

1.3.1 Contextualização histórica

O objetivo principal dos círculos meridianos foi a construção de catálogos de estrelas para análise da dinâmica do universo, devido à sua eficácia e precisão. Contudo, antes do aparecimento do relógio atômico, o Círculo Meridiano era utilizado na determinação precisa da hora sideral através da observação de estrelas de coordenadas conhecidas. Este método permitia aferir o estado do relógio de um Observatório com uma exatidão de centésimos de segundo. Na figura 3, encontra-se exposto o Círculo Meridiano presente na Universidade de Coimbra.

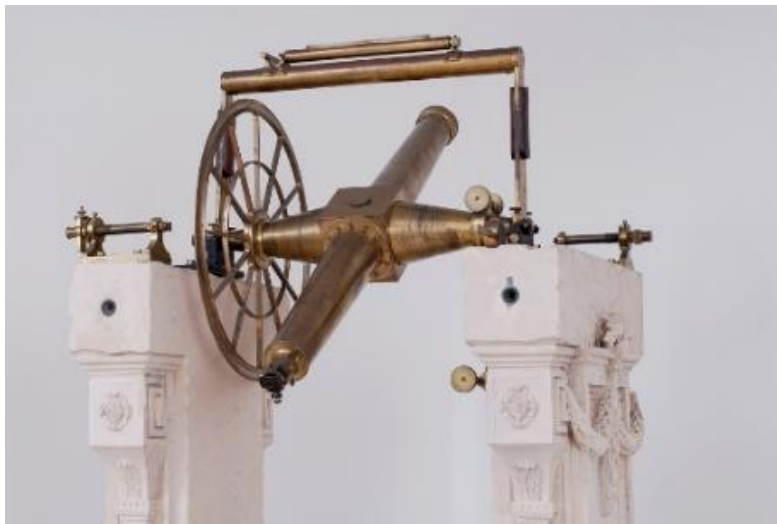


Figura 3- Círculo Meridiano da Universidade de Coimbra

À medida que a necessidade de maior rigor na determinação da hora foi crescendo, as lunetas astronómicas foram aumentando de tamanho, sem que a ciência dos materiais acompanhasse o avanço. Como consequência, as lunetas astronómicas tornaram-se cada vez mais compridas e mais pesadas, originando problemas de flexão. Por esse motivo, o Doutor R. d'E. Atkinson, do Observatório de Greenwich, decidiu construir um Círculo Meridiano de Espelho, no qual o espelho central é separado das lunetas, para que o comprimento destas pudesse ser maior.

O Círculo Meridiano de Espelho do OAUP, representado na figura 4, foi construído pelo Professor Manuel de Barros, entre 1957 e 1967. Este Círculo Meridiano de Espelho é um dos três equipamentos deste tipo alguma vez contruídos no Mundo e encontra-se inserido num abrigo de liga de alumínio, denominado como “Casa do Círculo Meridiano” (Figura 5). Os outros dois foram instalados nos Observatórios de Pulkovo, na antiga união Soviética, e em Ottawa, no Canadá.

As lunetas astronómicas têm 3 metros de comprimento e 200 mm de diâmetro e encontram-se alinhadas na direção Norte-Sul com um espelho plano de 250 mm de diâmetro rotativo entre elas.

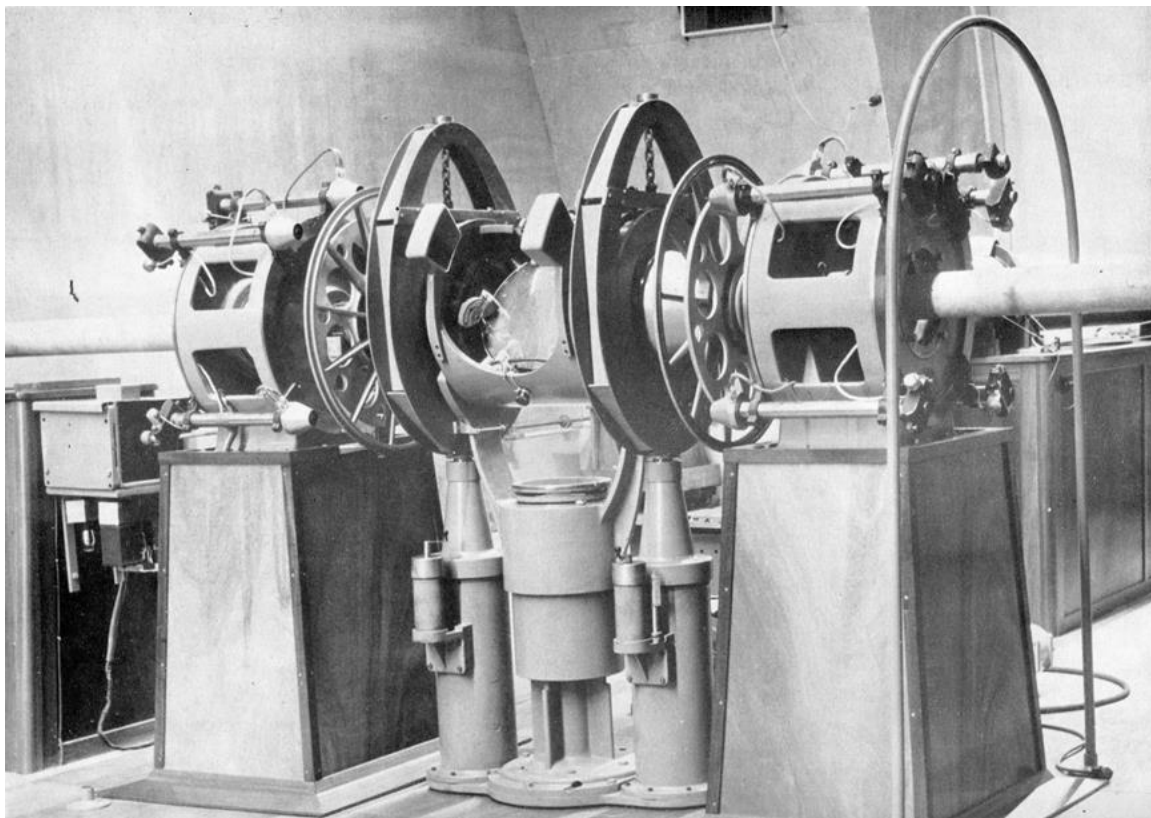


Figura 4- Círculo Meridiano de Espelho UP em 1967 [34]



Figura 5- Casa do Círculo Meridiano em 1957 [1]

1.3.2 Funcionamento do Círculo Meridiano do OAUP

O Círculo Meridiano é composto por inúmeras peças que, trabalhando em conjunto, permitem observar corpos celestes e calcular a hora da sua passagem. Na sua totalidade, o C.M.E. pode ser agrupado em três sistemas: (1) mecânico; (2) elétrico; (3) ótico.

Na figura 6 encontra-se exposto o C.M.E., os postos de observação Norte-Sul e o relógio indicador da hora sideral. Esta fotografia remete ao instrumento antes da intervenção deste trabalho.

O sistema mecânico é composto por:

- Bases do telescópio;
- Eixo do espelho e os seus suportes;
- Espelho central e o seu conjunto de equilibragem;
- Micrómetros localizados nos postos de observação.

O sistema ótico é composto por:

- Colimadores de observação;
- Colimadores de calibração;
- Miras;
- Espelho.

Existem dois tubos de observação, denominados de *colimadores*, alinhados com a direção Norte-Sul, com os seus eixos de revolução no mesmo plano que o eixo de rotação do espelho. Cada tubo contém dois conjuntos óticos: a ocular, mais próxima do observador, e a objetiva, situada na outra extremidade.

O sistema elétrico inclui:

- Motorização para rodar em torno do seu eixo de revolução e em torno do eixo vertical;
- Alimentação elétrica do equipamento;
- Iluminação;
- Sistemas de processamento de informação.

O espelho e o seu conjunto de equilibragem encontram-se descritos em pormenor no próximo subcapítulo.



Figura 6- Eixo central do C.M.E., os postos de observação Norte e Sul, e o relógio indicador da hora sidereal

Originalmente, o C.M.E. era comandado para uma determinada posição na esfera celeste, através de um complexo sistema eletromecânico composto por motores Selsyn e Magslip. Em 2011, durante a primeira fase de restauro do C.M.E., foi incorporado no sistema um conversor A/D, com vista à articulação de novos sistemas digitais com o sistema analógico original. Atualmente, o C.M.E. pode ser comandado por computador ou fazendo uso dos comandos analógicos originais.

Um pormenor que pode ser visto na figura 7, no contacto entre a roda do eixo do C.M.E. e o pinhão responsável por transmitir a rotação, é o facto do tamanho dos dentes ser pequeno. Isto foi feito de modo a que o escorregamento entre os dentes da roda e do pinhão fosse mínimo, reduzindo o ruído.



Figura 7- A roda do Eixo central do C.M.E. e pinhão responsável por transmitir a rotação desejada foram construídos de forma a terem uma pequena altura de dente, para minimizar o escorregamento entre dentes

1.3.3 Espelho e Conjunto de equilibragem

O espelho plano do Eixo do Círculo Meridino foi produzido pela empresa inglesa Cox, Hargreaves & Thompson. O espelho é feito de hysil e silicato de boro. É uma peça com 360mm de diâmetro.

Aquando da sua construção, o espelho encontrava-se fixo por uma solução engenhosa que tentava contrariar deslocamentos radiais e axiais, de forma a manter o espelho o mais fixo possível, durante a sua rotação. Esta solução era constituída por:

- Três parafusos micrométricos, com eixos paralelos e normais à face aluminizada do espelho, colocados nos vértices de um triângulo equilátero;
- Três molas de compressão, que permitiam a correção da posição da face aluminizada;
- Dois outros parafusos micrométricos de eixos paralelos ao eixo do instrumento, que atuavam sobre dois entalhes abertos no espelho, apertando contra eles por duas molas, permitindo deslocamentos naquele plano segundo uma reta.
- Finalmente, um sexto parafuso micrométrico, de eixo perpendicular aos dois últimos e uma mola de compressão fixavam o espelho.
- Um conjunto de 9 ventosas que asseguravam a centragem axial do espelho. Independentemente da amplitude a que estivesse a trabalhar, as ventosas mantinham o espelho o mais imóvel possível.

Uma fotografia tirada em 1967, representada na figura 8, mostra o espelho e a sua estrutura de equilibragem. *“Para reduzir os esforços dos parafusos, o espelho é equilibrado com dois contrapesos alojados no interior das partes cilíndricas. Cada contrapeso é formado por um tubo em bronze ligado ao eixo por um cardan, tendo um peso em chumbo no extremo do lado do munhão.”* [4] O objetivo dos contrapesos é de igualar o momento causado pelo peso do espelho. Encaixados no anel, fazendo 45° com o eixo, existia um conjunto de 4 cilindros pneumáticos que mantinham o espelho centrado radialmente.

Contudo, apesar do esforço para imobilizar o espelho durante a rotação, foi observado que isto não era possível. Para calcular o valor da hora de forma correta, era necessário ter em consideração o erro relativo ao deslocamento do espelho, e o método utilizado foi calculando os **valores das irregularidades dos munhões**. Os munhões pertencem ao eixo do C.M.E. e são dois braços tubulares com as extremidades retificadas que assentam nos seus suportes (Figura 8).

De forma a calcular as irregularidades, foi utilizado um microindicador e foram efetuadas 5 séries de medições com 72 leituras do microindicador, feitas em posições do eixo com 5° de intervalo [1]. A essas irregularidades foi atribuído o nome L_m e encontram-se, em forma gráfica, na figura 9.

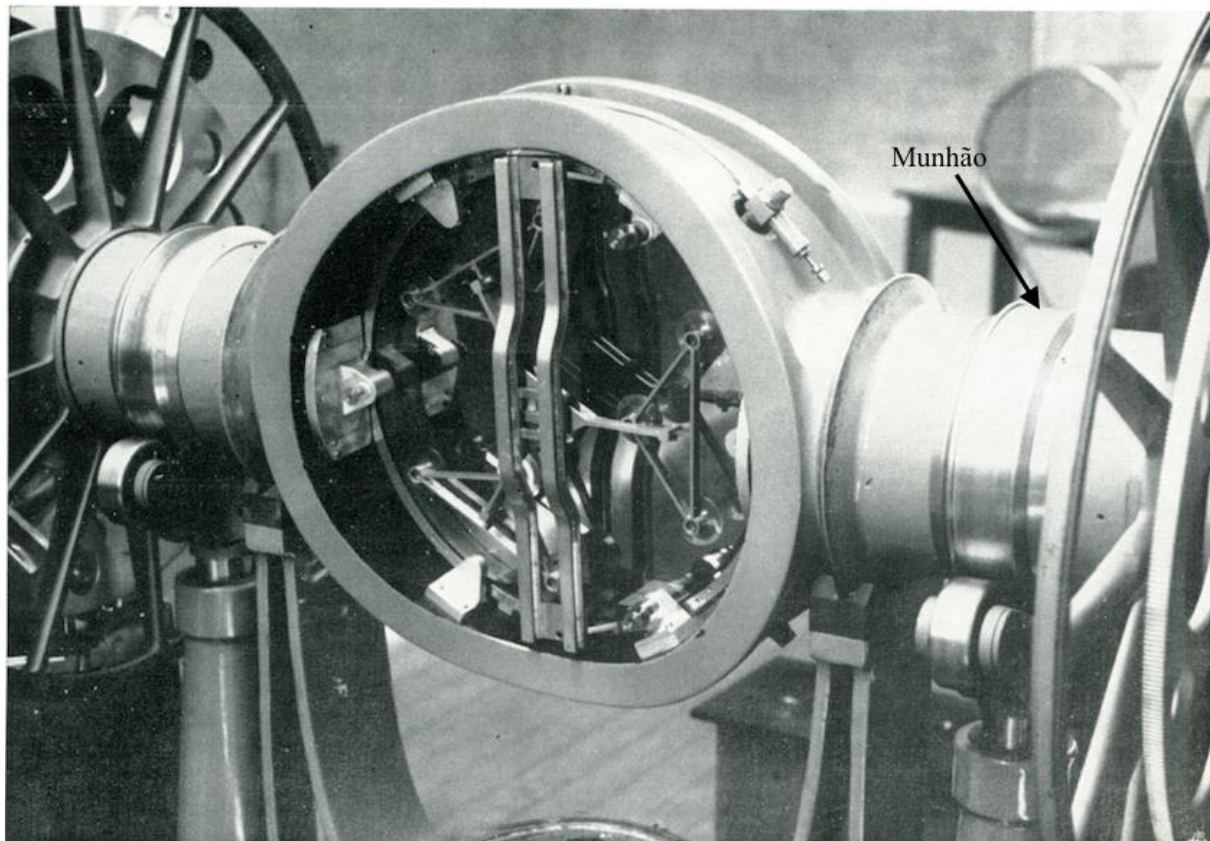


Figura 8- Espelho central e o seu mecanismo de equilíbrio em 1967 [1]. Na extremidade do eixo, o munhão indicado assenta no seu suporte

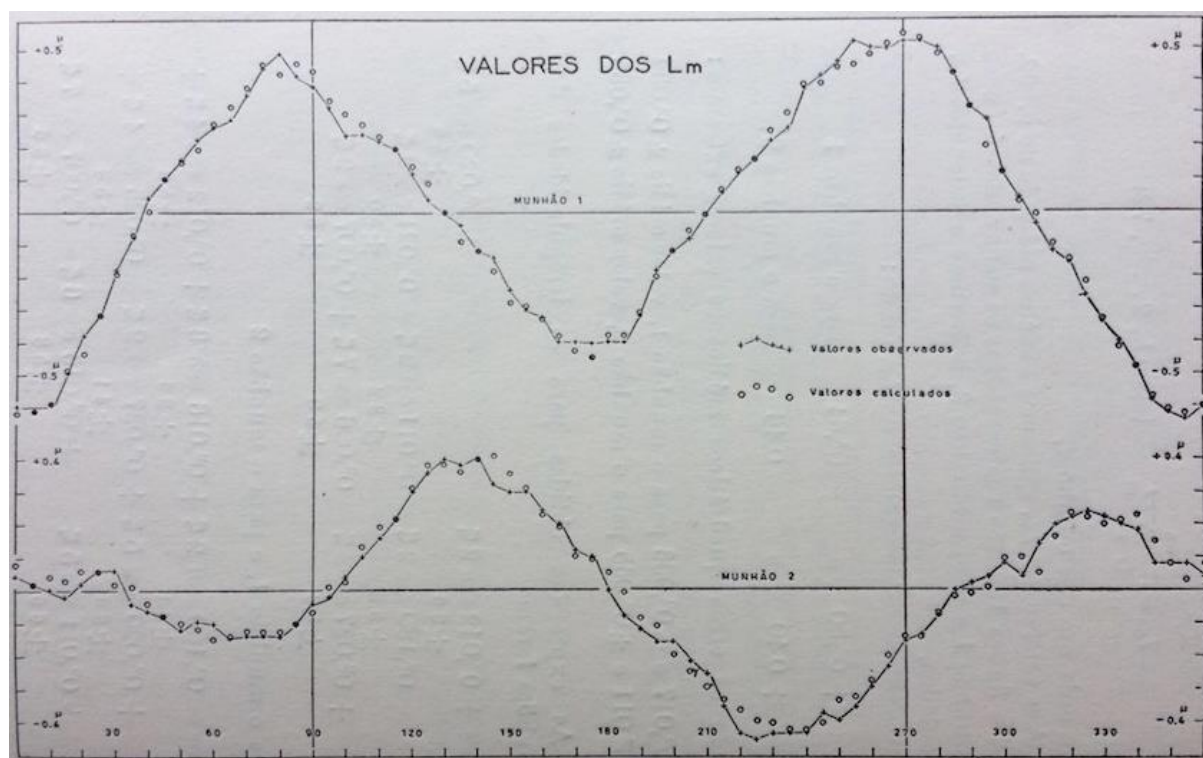


Figura 9- As irregularidades dos munhões(L_m) podem ser observadas comparando os valores observados com os calculados [1]

Atualmente, após o restauro funcional do C.M.E., os êmbolos foram substituídos por molas que exercem o mesmo propósito. Quando o espelho se encontra na vertical, apenas duas das molas suportam a carga. Quando a face do espelho se encontra na horizontal, nenhuma das molas recebe carga.

Foi também acrescentado um braço de latão que suporta um dispositivo de vácuo cuja função é puxar o espelho para o interior do eixo. Além disto, existem três pequenas ventosas que substituem as nove anteriores. O aspeto atual da célula que suporta o espelho encontra-se modelado em SolidWorks na figura 10. Este modelo de SW é da autoria do Eng. Bernardo Relvas.

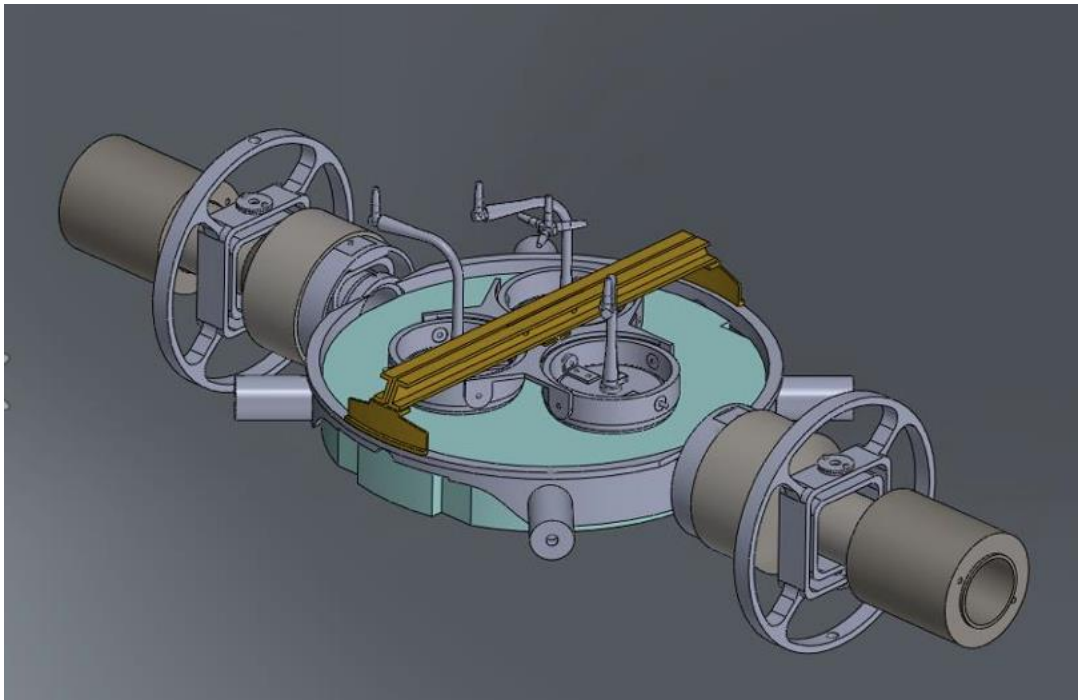


Figura 10- Modelo SolidWorks do conjunto de equilibragem atual do Espelho do Círculo Meridiano

1.3.4 Observação das Estrelas

O Posto de Observação é o painel de controlo de todo o processo. Para observar as estrelas do Sul, o astrónomo senta-se no Posto de Observação Sul, onde tem ao seu dispor um conjunto de equipamentos que lhe permitiam registar as observações feitas (Figura 11). Para observar as estrelas do Norte, o astrónomo senta-se do lado oposto.

Os componentes presentes no Posto de Observação Sul são os seguintes:

- **Mecanismo de Desmultiplicação:** Responsável por fazer corresponder a velocidade de translação do fio móvel do micrómetro registador com a velocidade com que a estrela atravessa o campo do micrómetro.
- **Comando do Espelho:** Comando analógico da posição angular do espelho, realizado por dois botões circulares de grande diâmetro.
- **Micrómetro Registador:** Mecanismo incorporado no colimador, no qual se efetua a observação dos corpos celestes. Este aparelho sofreu várias alterações, contudo, o seu objetivo é permitir a bisseção do corpo celeste num ou mais fios de teia de aranha. No instante de passagem da estrela no fio, eram registadas as suas coordenadas.
- **Unidade de Processamento:** Depois da observação, a informação era guardada e registada numa unidade de processamento. Nesta unidade, uma impressora gravava os coeficientes geométricos em fita de papel ou cartões perfurados. Estes cartões seriam usados, mais tarde, para calcular a hora exata de passagem das estrelas no computador central da Faculdade de Ciências.

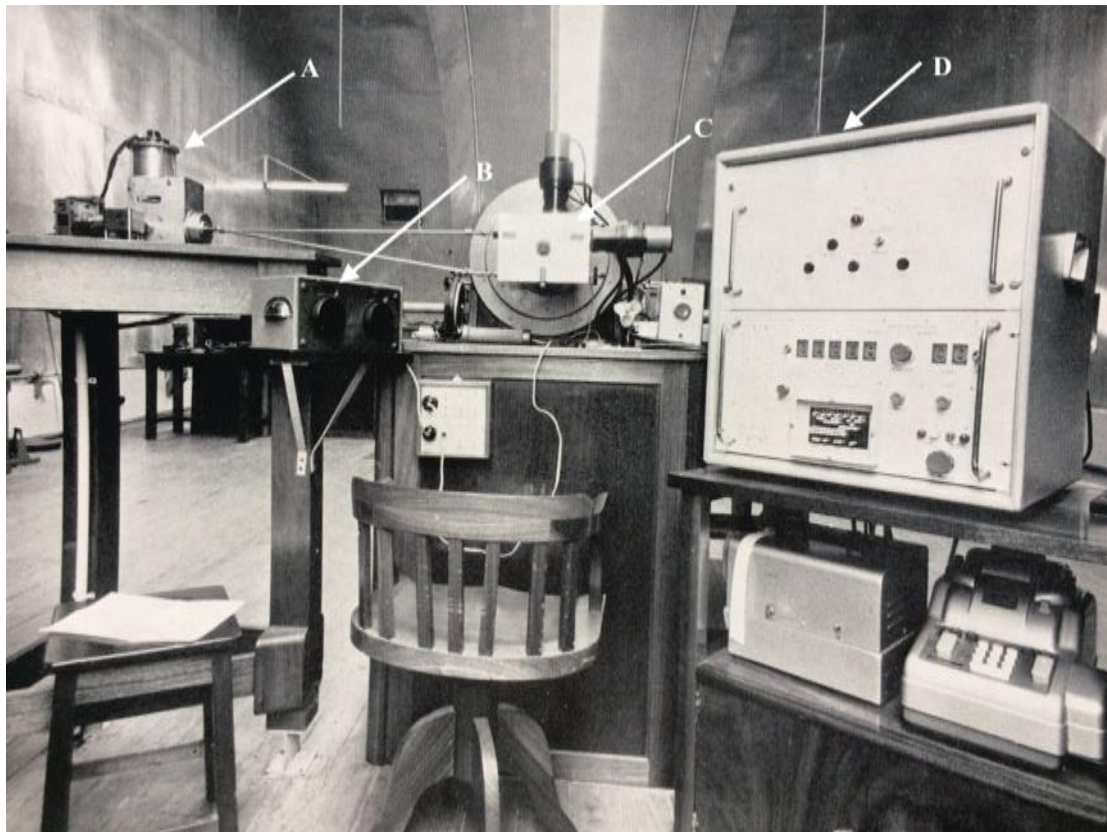


Figura 11-Posto de Observação Sul [1]. Da esquerda para a direita, os seguintes componentes estão representados: (A) Mecanismo de Desmultiplicação; (B) Comando do Espelho; (C) Micrómetro Registador; (D) Unidade de Processamento

Relativamente ao micrómetro registador, sabe-se que existiram várias versões. A primeira apenas continha um fio fixo vertical. Quando uma estrela cruzava o fio, o observador apontava o instante de passagem. Mais tarde, houve modificações ao micrómetro de forma a tornar o processo de observação das estrelas mais eficiente. Dentro da caixa do micrómetro foram adicionados dois carris permitindo o movimento horizontal e vertical. Em vez de apenas um fio, foram adicionados mais fios verticais feitos com teia de aranha, espaçados de igual forma (entre 4 a 7 micrómetros), para que as estrelas pudessem ser seguidas por qualquer um deles. O micrómetro presente na figura 12 é uma versão na qual o movimento ainda era manual.

Mais tarde, foi desenvolvido um sistema automático que permitia seguir as estrelas sem a necessidade de intervenção manual, a partir da translação de um fio móvel, que se move à velocidade do corpo celeste (o mecanismo de desmultiplicação é responsável por fazer corresponder a translação do fio móvel com a velocidade do corpo celeste). O movimento horizontal é possível, introduzindo ao micrómetro registador um integrador mecânico.



Figura 12- Versão do micrómetro registador com o carril que permite o seu movimento horizontal

1.3.5 Procedimento de medição da hora

Como a Terra roda a uma velocidade aproximadamente constante, é possível determinar com antecedência que uma determinada estrela pode ser observada numa determinada coordenada e hora. Isto é possível uma vez que, à semelhança do Sol, todas as estrelas percorrem uma trajetória ascendente até cruzar o ponto mais alto do meridiano do observador, num instante denominado de **culminação**.

Como explicado no subcapítulo 1.2, uma estrela pode ser identificada na esfera celeste através de duas coordenadas. Por exemplo, uma dada estrela X , pode ser expressa por:

$$X = (\alpha, \delta) \quad (1)$$

em que a estrela X pode ser localizada a partir de α , a sua **ascensão reta** e de δ , a sua **declinação**.

O processo de medição da hora é um processo iterativo, em que cada observação é uma confirmação dos dados registados noutra observação. Ou seja, o astrónomo, após a escolha do corpo celeste a observar, consulta o catálogo no qual está indicado a hora a que o objeto vai passar. No catálogo está também indicada a *declinação* e a *ascensão reta* dessa estrela, variáveis essas que vão ser confirmadas e, se necessário, reescritas pelos novos dados retirados.

Sabendo a hora a que uma determinada estrela vai passar no meridiano do C.M.E., é possível apontar o espelho para essa estrela, utilizando os comandos existentes para o efeito, e observar a sua passagem no instante em que cruza o meridiano. De forma a ter hora GMT, na cave do edifício principal, a “Sala das Pêndulas”, a hora era dada por um processo desenvolvido no Observatório. A hora era então transmitida ao astrónomo e era mostrada no relógio presente na sala (Figura 13).

Momentos antes de o corpo celeste pretendido passar no meridiano do C.M.E., é necessário rodar o instrumento para a posição correta. É necessário calcular o ângulo a ser inserido no comando do Espelho, instrumento representado na figura 14. Para tal, utiliza-se uma equação que relaciona a latitude, a declinação, e o ângulo a ser inserido no posto de controlo:

$$2\lambda = \varphi + 90 - \delta \quad (2)$$

em que λ é o ângulo a ser colocado no aparelho de comando do C.M.E. (no posto de observação Norte ou Sul), φ é a latitude e δ é a declinação.

Após a rotação do eixo do C.M.E. para o ângulo λ e o seu nivelamento, aguarda-se que a rotação da Terra arraste a sua imagem até o campo do colimador. Nesse instante, é efetuado o registo da ascensão reta do corpo, que é igual à hora sideral [5].

$$HS = \alpha_{estrela}|_{meridiano} \quad (3)$$

O registo da ascensão reta e da declinação foi, durante muito tempo, manual. A observação das estrelas era feita por dois astrónomos, sendo que um observava as coordenadas da estrela, e o outro apontava os valores. Mais tarde, foram adicionadas ao micrómetro registador duas câmaras “Robot” que faziam o registo automático.

Como explicado no subcapítulo anterior, existiram várias versões do micrómetro registador. Utilizando a versão que já contemplava o integrador mecânico que lhe permitia o movimento horizontal, juntamente com o mecanismo de desmultiplicação que permitia atingir a velocidade pretendida, era possível fazer o *tracking* de uma estrela à velocidade com que esta se movimentava: *“Estando a imagem da estrela a mover-se no campo do colimador e o fio móvel a mover-se com a velocidade da imagem da estrela dentro da aproximação que o oscilador permite obter, o observador bissecta a imagem da estrela antes de chegar ao intervalo central dos fios do retículo, utilizando o tambor do diferencial, e seguidamente carrega no botão que inicia o processo de relâmpagos. Entre cada dois relâmpagos sucessivos o observador deve romper a bissecção da imagem da estrela e efetuá-la novamente utilizando o diferencial. Na observação de uma estrela devem efetuar-se pelo menos 10 bisseções [1].”* Os relâmpagos mencionados eram originados por uma lâmpada Mullard.

Após a obtenção da Hora Sideral, esta é convertida em hora GMT.



Figura 13- Comando do Espelho do C.M.E, onde é inserido o ângulo para qual o eixo do C.M.E. deve rodar. Este ajuste angular é feito a partir de dois botões: o da esquerda com grande sensibilidade (para ajustamentos angulares grossos) e o da direita com uma pequena sensibilidade (para ajustes angulares finos).



Figura 14- Relógio presente na sala do C.M.E., indicador da hora GMT

1.3.6 Sistema de nivelamento por vasos comunicantes de mercúrio

De forma a compreender o antigo sistema de nivelamento do C.M.E., é necessário introduzir alguns dos seus componentes. O eixo central do C.M.E. encontrava-se, e ainda atualmente se encontra, apoiado em dois dispositivos denominados de **munhoneiras**. Cada uma suporta o eixo e, por sua vez, apoia-se num cilindro hidráulico de ferro fundido.

Aquando da construção do C.M.E., idealizou-se que o eixo central tivesse liberdade para quatro movimentos diferentes: **(1)** rotação ao longo do eixo Este-Oeste, que permite acompanhar a posição das estrelas no céu; **(2)** rotação segundo o eixo Norte-Sul, que permite o nivelamento; **(3)** Rotação segundo um eixo vertical, ortogonal aos dois anteriores. Este movimento permite fazer a inversão do instrumento; **(4)** Translação vertical segundo o eixo mencionado no movimento anterior.

Contudo, o terceiro movimento, que permite realizar o movimento de inversão, **apenas** podia apenas ser realizado quando:

- O eixo do C.M.E. não se encontrava em rotação;
- O eixo do C.M.E. se encontrava na cota mais baixa, para que se evitasse o choque do eixo com as objetivas dos registadores fotográficos. Para tal, o instrumento realiza o quarto movimento.
- Se utilizasse o dispositivo de inversão do eixo.

O eixo do círculo meridiano descarrega o seu peso nas munhoneiras. Estas, por sua vez, encontram-se apoiada em dois cilindros hidráulicos feitos em ferro fundido. Dentro destes cilindros existiam dois êmbolos ocos, preenchidos com mercúrio. Estes êmbolos encontram-se ligados pelo princípio dos vasos comunicantes. Para regular a altura do mercúrio, e, consequentemente, a cota do eixo, eram utilizados dois copos alimentadores que existiam nas paredes dos cilindros, preparadas para o efeito. Estes alimentadores eram atuados por pistões que se encontravam fixos aos copos por meio de rosca com passo de 2mm (Figura 15). Uma vez que é aplicado o princípio dos vasos comunicantes, é indiferente atuar um ou outro pistão, sendo que o mercúrio era dividido pelos dois êmbolos, de forma a garantir a horizontalidade do eixo. Este sistema de impulsão encontra-se representado, em corte, na figura 16. Cada volta completa dos pistões dos alimentadores, no sentido dos ponteiros dos relógios, corresponde exatamente ao deslocamento vertical do eixo de 2.77mm.

Atualmente, este dispositivo de inversão do eixo já não existe, e, para se realizar o terceiro movimento, o C.M.E. deve encontrar-se na sua cota mais **alta**, contrariamente à versão inicial.

Para realizar a inversão, o C.M.E. descreve uma translação vertical, e, para tal, utiliza-se um mecanismo composto por um motor elétrico e uma alavanca para ajustamentos manuais mais precisos.

Quando a inversão era realizada na sua cota mais baixa, o funcionamento era o seguinte: o motor era ligado, pressionava-se o botão “*Descer*” e era iniciada a descida do C.M.E. Após a inversão do eixo, quando se pretendia subi-lo novamente, era essencial que a posição fosse obtida com o menor erro possível, pelo que, quando dois fins-de-curso nos extremos do percurso vertical eram atuados, o motor era desligado automaticamente. Com o movimento manual da alavanca faziam-se os ajustes mais precisos. Na figura 17 encontra-se representado o motor referido e a alavanca para os ajustes manuais.

Atualmente, também se utilizam dois fins-de-curso que, a partir do sistema desenvolvido neste trabalho, posicionam o C.M.E. na cota de inicialização.

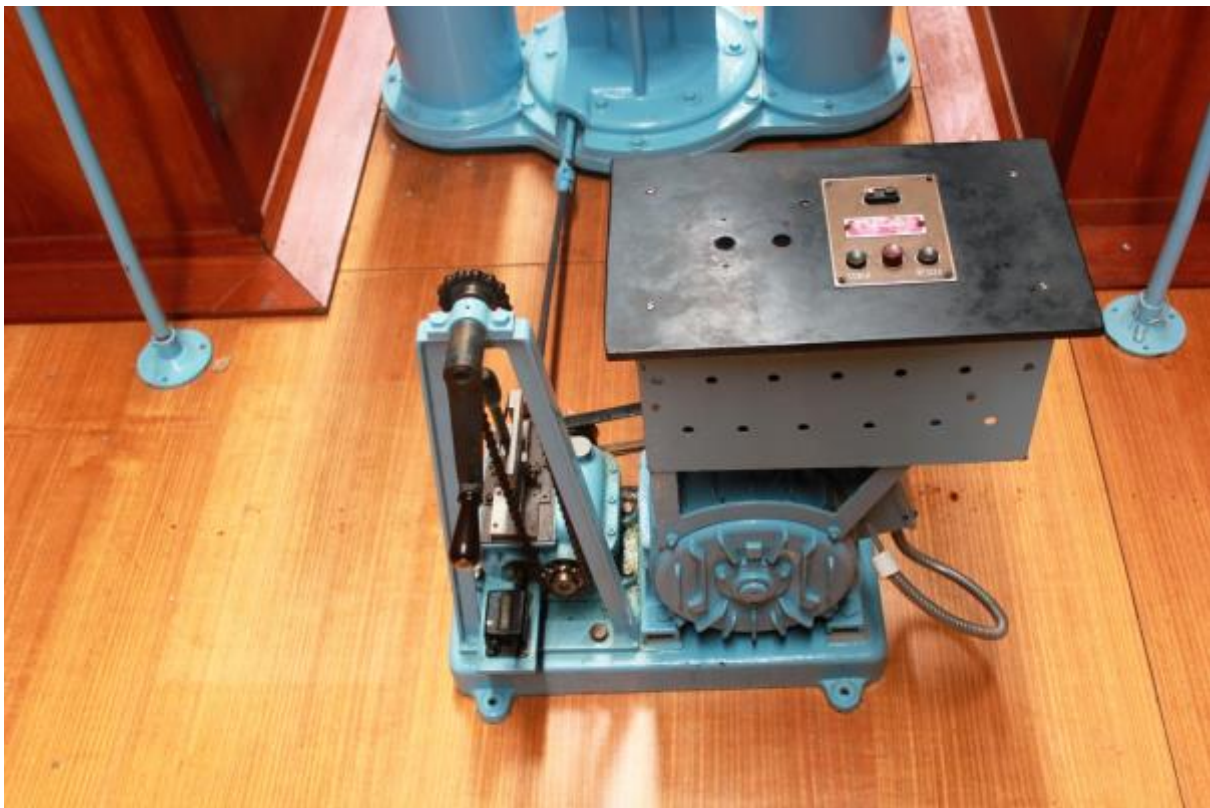


Figura 17- Motor de Eixo, utilizado para realizar um movimento vertical no eixo do C.M.E., perpendicular ao eixo Este-Oeste

1.4 Novo sistema de nivelamento

A investigação desenvolvida neste trabalho tem como objetivo conceber um sistema capaz de realizar um nivelamento submicrométrico do eixo central do C.M.E., sem necessitar de intervenção humana.

A elaboração das soluções para o trabalho envolve conhecimentos de processamento de imagem e de programação de motores passo-a-passo, sendo que ambas as etapas são desenvolvidas com a ferramenta “MATLAB®”.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram cumpridas as seguintes etapas:

1. Definição da arquitetura e dos componentes do sistema eletromecânico a integrar;
2. Montagem do sistema eletromecânico;
3. Recolha e processamento dos dados capturados pela câmara;
4. Programação dos controladores;
5. Interligação entre os dados capturados pelo processamento de imagem e o controlo dos motores;
6. Testes e Conclusões;

Numa primeira abordagem à questão do nivelamento, foi realizado um levantamento sobre os métodos de nivelamento já existentes, através da deteção de pequenas inclinações angulares.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação inicia-se com uma contextualização do Círculo Meridiano de Espelho, o seu funcionamento, utilidade, e o principal problema que origina o seu desalinhamento durante a rotação. É explicado o processo original de assegurar a horizontalidade do eixo, baseado em mercúrio, e é justificada a sua remoção. Consequentemente, é explicada a pertinência deste trabalho e a sua importância na correta medição da hora.

Posteriormente, são apresentados conceitos astronómicos importantes para o funcionamento do Círculo Meridiano de Espelho, assim como são apresentados alguns dos seus componentes mecânicos e óticos. Finalmente, é explicado o procedimento de medição de hora.

No **segundo capítulo** é feito um levantamento dos procedimentos mais comuns para a deteção de pequenas inclinações angulares, sendo estes a interferometria e a autocolimação. Após uma análise dos conceitos subjacentes a cada uma das técnicas, é feita uma comparação entre as duas e explicado o motivo pela qual se deu preferência à autocolimação neste trabalho. Chegase à conclusão que a autocolimação é uma técnica de elevada precisão e sensibilidade, ideal para o nivelamento de instrumentos astronómicos.

No **terceiro capítulo** é apresentada a arquitetura do sistema eletromecânico e os componentes que lhe pertencem. É justificada a necessidade de adicionar dois redutores aos motores passo-a-passo, calculando o binário necessário para elevar, suportar e descer a carga correspondente ao eixo do Círculo Meridiano. É também apresentado o circuito elétrico, e as ligações que foram estabelecidas.

O **quarto capítulo** aborda a área de processamento de imagem, nomeadamente alguns dos módulos mais importantes do algoritmo desenvolvido em MATLAB®. É explicado como se procede à aquisição de imagem e como se estabelece uma relação entre o tamanho de pixel da câmara e o deslocamento lateral do feixe de laser refletido, em relação ao de origem.

No **quinto capítulo** procede-se à explicação da comunicação série estabelecida com os motores passo-a-passo. São apresentados os comandos mais importantes que foram utilizados neste trabalho. Posteriormente, é feita a integração destes comandos com o software MATLAB®.

Sendo explicado o algoritmo de processamento de imagem, responsável por detetar e calcular a distância entre os dois feixes de laser, assim como o controlo dos motores, é possível apresentar a metodologia utilizada para interligar os dois sistemas. No **sexto capítulo** é feita esta explicação, por meio de duas etapas: **(1)** Na primeira etapa aborda-se a relação dependente entre o processamento de imagem e controlo dos motores; **(2)** Na segunda etapa é explicado o funcionamento geral do programa final de nivelamento, a partir de um grafcet. As etapas e transições são devidamente explicadas, assim como a interligação entre o sistema de rotação do Círculo Meridiano já existente, com o sistema desenvolvido neste trabalho. Finalmente, é sublinhado que este sistema apenas é capaz de atuar verticalmente no eixo do instrumento, pelo que existem momentos, durante a rotação, que os dois feixes se encontram a uma distância horizontal um do outro.

No **sétimo capítulo** são apresentados os testes que foram desenvolvidos, e os seus respetivos resultados. É também explicado como se determina o erro máximo admissível para o nivelamento do eixo.

Finalmente, no **oitavo capítulo** são apresentadas as conclusões retiradas no desenvolvimento deste trabalho e propostos trabalhos futuros.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

2. Detecção de pequenas inclinações angulares

A detecção de pequenas inclinações angulares é uma componente importante em áreas de Engenharia, tais como o nivelamento de sistemas mecânicos e calibração de ferramentas. Devido à sensibilidade do procedimento e assim como de, em vários casos, não existir contacto, o alinhamento ótico começou a substituir os métodos mecânicos, principalmente no nivelamento de equipamentos rotativos de alta velocidade. A principal causa do surgimento de vibrações em equipamentos rotativos era um resultado direto de um desalinhamento [6].

Em consequência, os procedimentos óticos começaram a ser explorados e, atualmente, as técnicas mais comuns para medir deslocamentos angulares ou pequenas inclinações são a autocolimação e a interferometria [7].

A **autocolimação** mede a variação angular, detetando um deslocamento lateral entre um feixe de origem e um feixe refletido. Como princípio, utiliza um feixe de luz colimada. Contudo, a gama de trabalho providenciada pelo autocolimador é limitada, uma vez que a luz refletida tem que ser enviada sensivelmente na mesma direção do que a emitida, para garantir uma difração¹ pequena. Em caso contrário, uma difração excessiva diminui a sensibilidade angular.

Em contraste, na **interferometria**, não existe esse constrangimento de gama. A interferometria é baseada no princípio de interferência de dois feixes que atravessam percursos óticos diferentes, sempre que um deslocamento angular acontece. A sensibilidade de medição depende da distância entre as posições de medição no objeto.

A interferometria é usada em variadíssimas áreas da Engenharia e Física, tanto em deslocamentos angulares, como no estudo da vibração de superfícies e variações de temperatura. É um método eficaz, barato e abrangente. Existem algumas variações do método da interferometria, sendo que a *Interferometria de Lau*, associada aos conceitos de Moiré, já foi provada ser útil para medir pequenas inclinações angulares [8].

Tanto na *interferometria* como na *autocolimação*, é cada vez mais frequente a substituição de uma fonte de luz branca por um *laser*, devido, principalmente, ao facto de o laser ser uma fonte de luz já colimada, de alta energia. Além disto, o laser oferece coerência temporal e espacial, embora seja mais caro.

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos dos dois métodos e a sua pertinência para a detecção de pequenas inclinações angulares. No subcapítulo 2.3 procede-se à comparação entre os dois métodos e justifica-se a escolha da autocolimação para o nivelamento do Círculo Meridiano de Espelho.

¹ A difração é um fenómeno que ocorre quando a luz encontra um obstáculo.

2.1 Interferometria

Antes de se proceder à explicação da interferometria de Lau e a sua aplicação na medição de pequenas inclinações angulares, o conceito de **Padrão de Moiré** e de **Efeito de Talbot** são apresentados, uma vez que estes constituem a base da interferometria.

No subcapítulo 2.1.1 o padrão de Moiré é explicado, a sua importância na indústria e investigação, assim como as condições em que este pode ser observado.

No subcapítulo 2.1.2 o conceito de *imagem própria* (self-image) é explicado, com base no efeito de Talbot.

Após esta introdução à interferometria, no subcapítulo 2.1.3, o conceito de interferometria de Lau e a sua aplicação na medição de pequenas inclinações é apresentado, através de uma experiência realizada nesse âmbito.

2.1.1 Padrão de Moiré

A interferometria de Moiré é uma ferramenta importante na indústria e na investigação. É usada para medir pequenas deformações de corpos sólidos, causadas por forças mecânicas, alterações de temperatura ou outras variáveis do sistema [9].

Esta técnica já foi aplicada em diversas áreas, nomeadamente em estudos de materiais compósitos, materiais policristalinos e piezoelétricos e fraturas mecânicas. Uma aplicação muito comum é na indústria microeletrónica, para medir, a partir de variações de temperaturas, deformações de componentes eletrónicos.

Um padrão Moiré é um padrão de interferência que é criado quando dois padrões apresentam um movimento relativo entre si, relativamente a um observador. A partir desta interferência é possível determinar o perfil e a deformação de objetos. Este comportamento está presente na figura 18, onde um padrão Moiré é criado entre linhas retas, da mesma espessura, mas deslocadas de um ângulo α entre si.

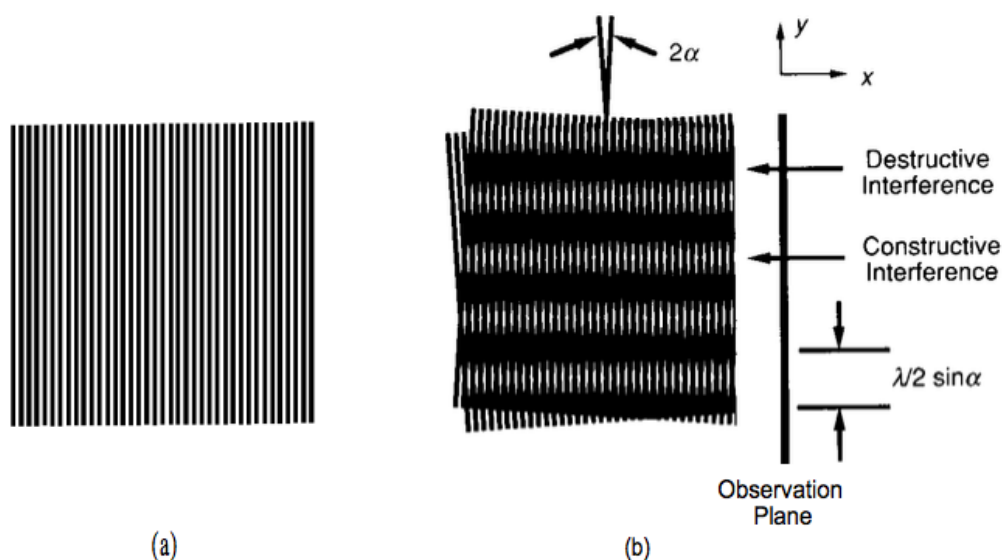


Figura 18-(a) Padrão de linhas retas. (b) Padrão Moiré entre linhas retas da mesma espessura, desviadas de um ângulo α entre si [36]

2.1.2 Efeito de Talbot

O efeito de Talbot é um efeito de difração que ocorre numa superfície periódica, quando incidida por uma fonte de luz. As ondas associadas à luz produzem imagens repetidas, que se encontram deslocadas de si próprias. A distância entre a imagem original e a repetida é designada de *distância de Talbot* e as imagens são denominadas de “*imagens próprias*” ou “*imagens Talbot*”.

Na parte esquerda da figura 19 é possível observar a difração da luz através de um retículo(*grating*), sendo que este padrão é reproduzido de forma igual no lado direito da imagem. Exatamente a metade do comprimento, a imagem encontra-se deslocada. Em frações regulares do comprimento de Talbot encontram-se representadas as sub-imagens.

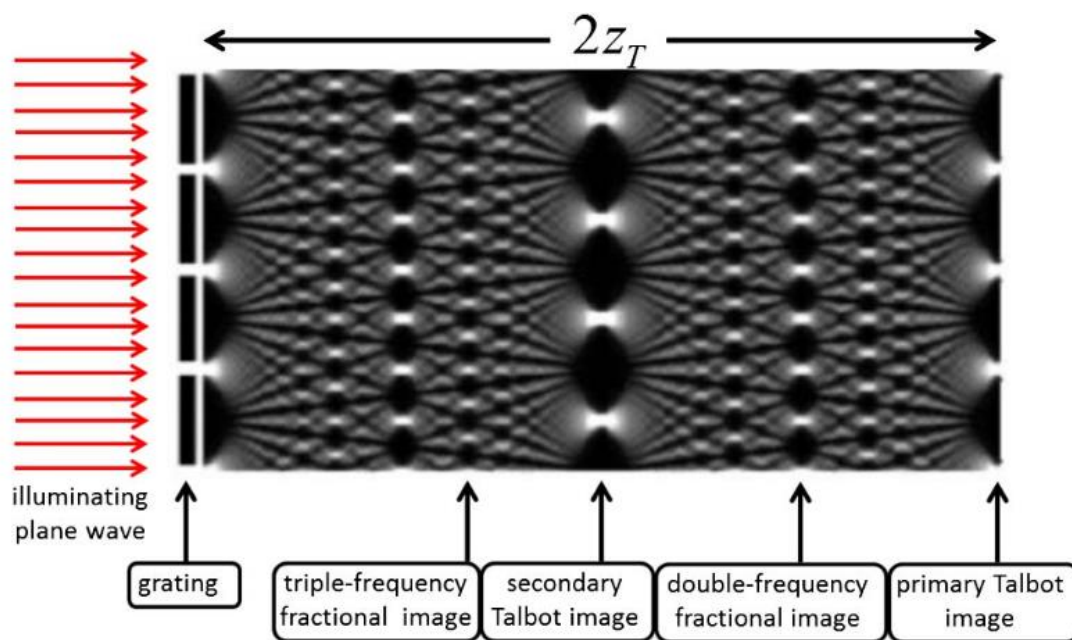


Figura 19- Efeito de Talbot para uma luz monocromática [37]

Um retículo é uma estrutura utilizada na ótica para formar padrões. É geralmente constituída por um conjunto de linhas paralelas e equidistantes.

2.1.3 Medição de pequenas inclinações angulares usando a Interferometria de Lau

2.1.3.1 Interferometria de Lau

O efeito de Lau é um fenómeno de interferência observado quando a luz passa entre dois retículos de difração, separadas de uma distância $Z = md^2/\lambda$, onde m , d e λ representam um número inteiro (que pode variar entre 1 e infinito) [10], o período entre as franjas e o comprimento médio do feixe de luz usado, respetivamente.

Na figura 20, um retículo G_1 é iluminado. Uma onda de luz enviada a partir de uma fração do retículo G_1 criará uma luz secundária que irá radiar em espaçamentos iguais, se os trajetos $\overline{SP_0}$ e $\overline{SP_1}$ diferirem entre si em múltiplos de λ . Isto é apenas possível se os dois retículos se encontrarem a uma distância de $Z = md^2/\lambda$ entre si.

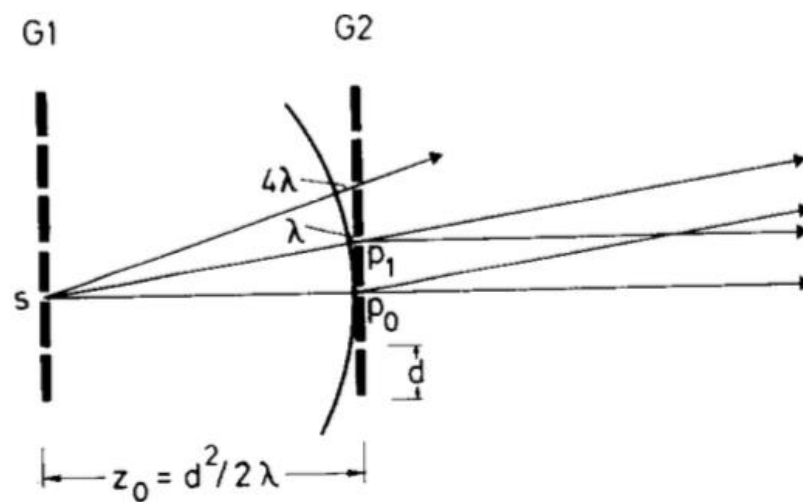


Figura 20- A distância entre uma fração do retículo G_1 e várias frações do retículo G_2 difere por múltiplos de λ , se os dois retículos se encontrarem a uma distância de $Z = md^2/\lambda$ [10]

A figura 21 representa um esquema da montagem ótica do sistema no qual se pretende associar o fenómeno de Lau ao efeito de Talbot e Moiré.

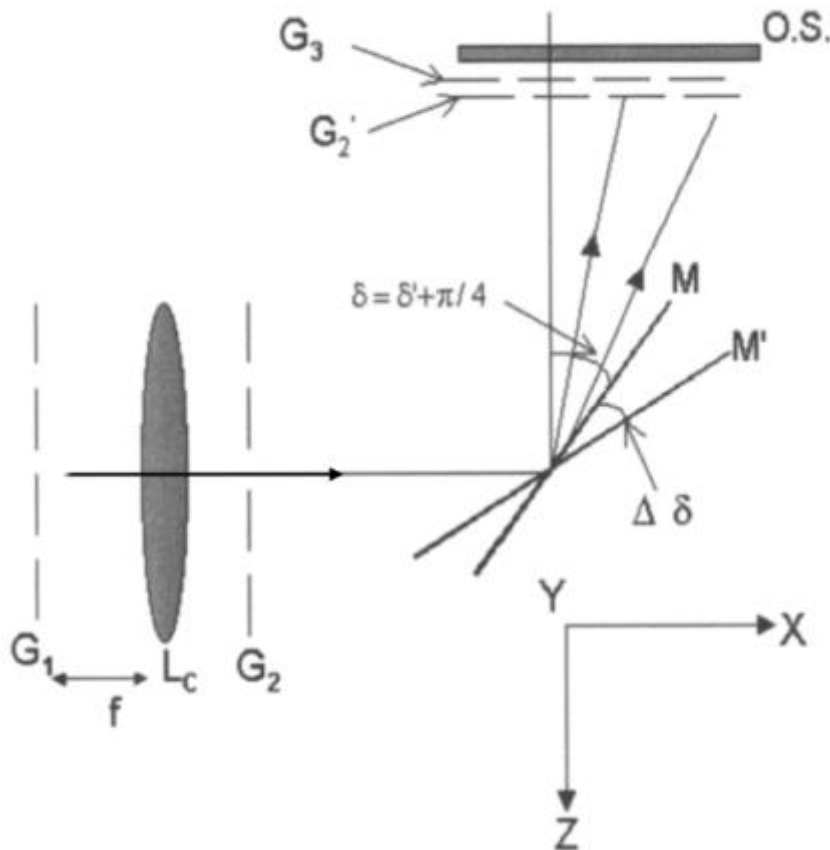


Figura 21- Diagrama esquemático representativo da medição de pequenas inclinações angulares utilizando a Interferometria de fase de Lau [8]

Uma luz branca ilumina um retículo G_1 , que após passar por este, é colimada por uma lente L_c e ilumina um retículo idêntico G_2 . A intensidade de distribuição em G_2 é o somatório dos padrões de G_1 antes e após a luz se deparar com a lente. Ao padrão criado pela difração da luz quando se depara com um objeto, ocorrente num campo próximo, pode ser dado o nome de imagem Fresnel, em honra ao físico Augustin-Jean Fresnel, que desenvolveu equações para estudar o efeito da difração da luz.

A imagem criada na interseção da luz colimada com o retículo G_2 interseja um objeto refletor, inclinado de um ângulo δ' relativamente ao eixo ótico, criando o padrão G_2' . A luz é então projetada para o retículo G_3 , no qual as franjas se encontram separadas à distância de md^2/λ , relativamente ao retículo G_2' , distância essa relativa ao fenómeno de Lau referido.

A imagem G_2' criada depende da inclinação do objeto, sendo que esta inclinação varia o afastamento das franjas. Se o ângulo de inclinação da superfície do objeto for de $\pi/4$, o afastamento(p) da imagem Fresnel G_2' mantém-se relativamente à franja G_2 . Se houver um desvio de δ' relativamente a $\pi/4$, o afastamento da imagem Fresnel G_2' pode ser calculada por:

$$p' = \frac{p}{\cos 2\delta'} = \frac{p}{\sin 2\delta} \quad (4)$$

O padrão de Moiré é obtido pela sobreposição da imagem G_2' refletida na superfície do retículo G_3 . A orientação das franjas de G_2' relativamente a G_3 podem variar, por um ângulo denominado de ângulo cruzado (*crossed angle*), representado por θ .

Se se assumir que as franjas de Moiré têm um ângulo de α_1 relativamente ao eixo x , a relação entre p' e p é dada por:

$$p' = p \frac{\cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \theta)} \quad (5)$$

Consequentemente,

$$\sin 2\delta = \frac{\cos(\alpha_1 + \theta)}{\cos(\alpha_1)} \quad (6)$$

Se a superfície do objeto estiver inclinada por uma quantidade de $\Delta\delta$, o afastamento p'' da imagem Fresnel G_2'' no eixo x é dada por:

$$p'' = \frac{p}{\sin 2(\delta + \Delta\delta)} \quad (7)$$

No caso de o ângulo das franjas de Moiré ser α_2 , a equação utilizada para calcular o ângulo de inclinação $(\delta + \Delta\delta)$ seria dado por:

$$\sin 2(\delta + \Delta\delta) = \frac{\cos(\alpha_2 + \theta)}{\cos(\alpha_2)} \quad (8)$$

Conjugando as equações 6 e 8, chega-se à seguinte relação:

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\alpha_2 + \theta)}{\cos\alpha_2} \right] - \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\alpha_1 + \theta)}{\cos\alpha_1} \right] \right\} \quad (9)$$

Quando o ângulo entre franjas θ do retículo G_3 é fixo, a variação $\Delta\delta$ pode ser obtida medindo os ângulos de inclinação α_1 e α_2 das faixas de Moiré.

2.1.3.2 Experiência prática

De forma a comprovar a aplicabilidade da interferometria de Lau para medir pequenas inclinações angulares, foram desenvolvidas várias experiências, nomeadamente em superfícies em rotação.

Consideremos uma experiência cujo esquema representativo se encontra na figura 22.

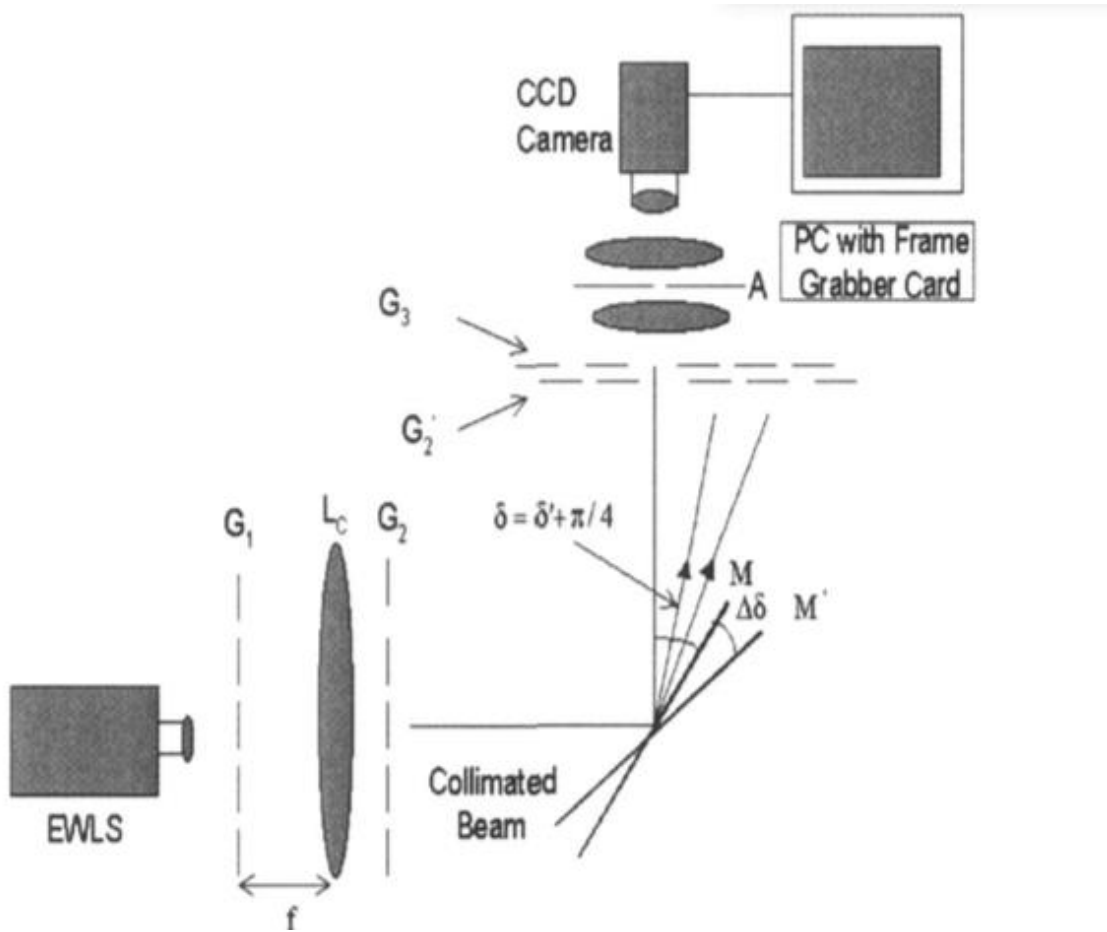


Figura 22- Diagrama esquemático de uma simulação real de medição de pequenas inclinações usando a interferometria de Lau [8]

Uma fonte de luz branca (EWLS) é usada. Os retículos G_1 , G_2 , G_3 são idênticos, com o mesmo período. O retículo G_1 é usado como de origem, e é colocado em frente ao plano frontal das lentes colimadoras L_c . O segundo retículo G_2 é colocado paralelamente a G_1 . O retículo G_3 é colocado no plano da auto-imagem de G_2 . O objeto de superfície M , colocado a um ângulo de inclinação δ relativamente ao eixo ótico, é colocado entre G_2 e G_3 . O ângulo de cruzamento entre os dois retículos mencionados é inicialmente orientado para 1° . Um espelho plano de 50mm de diâmetro foi escolhido como objeto.

A experiência é realizada ao variar a inclinação angular do objeto e capturar as correspondentes franjas de Moiré usando uma câmara CCD. Esta câmara cria uma interface com um computador pessoal, que, através de ferramentas de processamento de imagem, adquire o sinal vídeo transmitido pela câmara. O vídeo analógico adquirido é digitalizado com uma resolução de 8-bit e uma frequência de amostragem até 40 MHz. [8]

Os resultados obtidos, após terem sido feitas operações de melhoramento de imagem e redução de ruído estão dispostos na figura 23.

As figuras 23(a) e 23(b) mostram exemplos de resultados em que as franjas de Moiré apresentam inclinações diferentes, consoante a inclinação da superfície do objeto: $\alpha_1 = 13.7^\circ$ e $\alpha_2 = 21.9^\circ$, respetivamente.

Comparando as duas imagens da figura 23, tem-se uma inclinação $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = 8.2^\circ$. O ângulo de inclinação da superfície correspondente é de 0.81° . Neste caso, a inclinação das franjas de moiré ($\Delta\alpha$) correspondem a cerca de 10 vezes à inclinação no objeto ($\Delta\delta$). Esta amplificação é vantajosa na medida em que se obtém uma maior **sensibilidade de medição**.

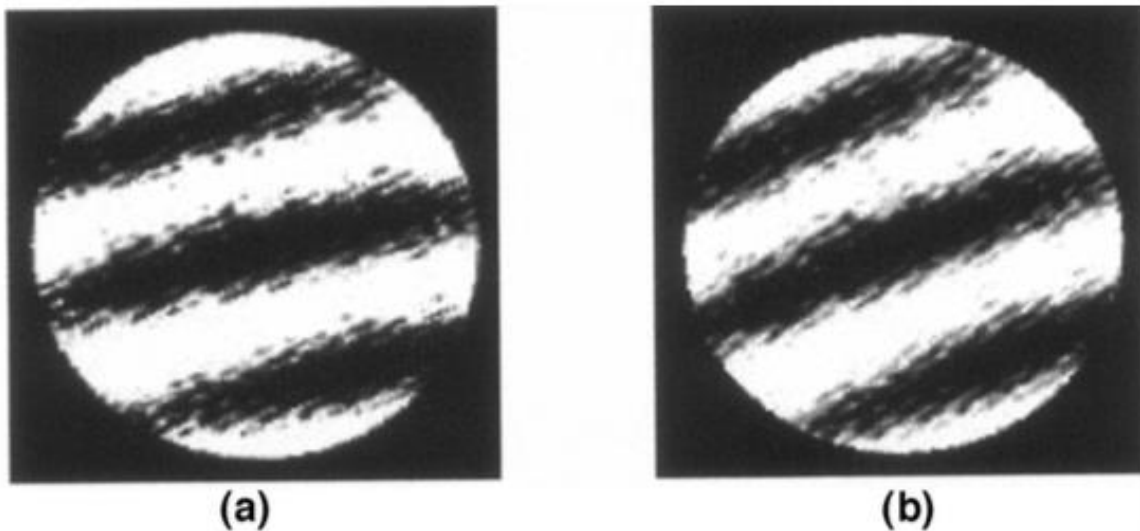


Figura 23- Franjas de Moiré obtidas, após melhoramento de imagem, para (a) $\alpha_1 = 13.7^\circ$ e (b) $\alpha_2 = 21.9^\circ$ [8]

Na figura 24 estão representadas as curvas teóricas que estabelecem a relação entre o ângulo de inclinação δ e a inclinação das franjas de Moiré α para um ângulo cruzado θ . Para medir a variação do ângulo de inclinação de uma superfície, a região apropriada é dada por estas curvas.

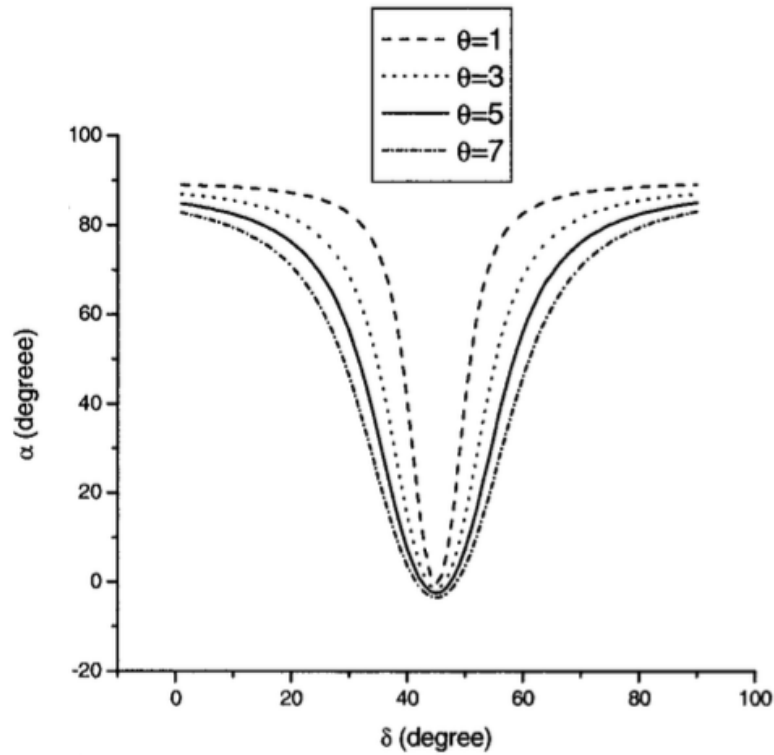


Figura 24- Curvas teóricas representativas entre o ângulo δ da superfície do objeto e o ângulo α das franjas de Moiré, para diferentes valores de ângulo cruzado θ [8]

Para um ângulo de $\theta=1$, quando a inclinação do objeto é de 45° , o sistema é o mais sensível para a medição de inclinações angulares.

De forma a averiguar a persistência destes resultados num sistema real, montou-se o objeto num mecanismo em rotação. Obteve-se uma repetibilidade de $\pm 3\%$, e uma exatidão de 1.6 mrad.

2.2 Autocolimação

Neste subcapítulo, são introduzidos os princípios da autocolimação, é introduzido o nivelamento do autocolimador na horizontal, e é estabelecida uma comparação entre a autocolimação e a interferometria. Finalmente, é justificada a escolha da autocolimação para este trabalho.

2.2.1 Princípios do Autocolimador

Para avaliar a qualidade do nivelamento dos instrumentos de passagem é necessário um método de avaliação. O método de avaliação de desnivelamentos em instrumentos de passagem mais utilizado durante o século XX era a **autocolimação**.

Um autocolimador é um instrumento ótico usado para medições de ligeiras inclinações angulares. São usualmente utilizados para alinhar componentes, especialmente espelhos planos, ou para assegurar o paralelismo de janelas óticas. São, atualmente, muito utilizados em medições de deflexões em sistemas óticos [11] e, em Engenharia, para alinhar sistemas mecânicos.

O autocolimador funciona projetando uma imagem num espelho alvo, e medindo a deflexão da reflexão dessa própria imagem. Esta discrepância é então medida visualmente ou através de um detetor eletrónico. A precisão do autocolimador pode ser prejudicada pelo desvio do feixe de luz, que, idealmente, teria que percorrer um determinado trajeto e voltar na mesma direção. De forma a corrigir este problema, os autocolimadores atuais aumentam o diâmetro do feixe. Idealmente, a área da superfície refletora deve ser pelo menos igual às das lentes da objetiva.

O princípio de um autocolimador encontra-se ilustrado na figura 25.

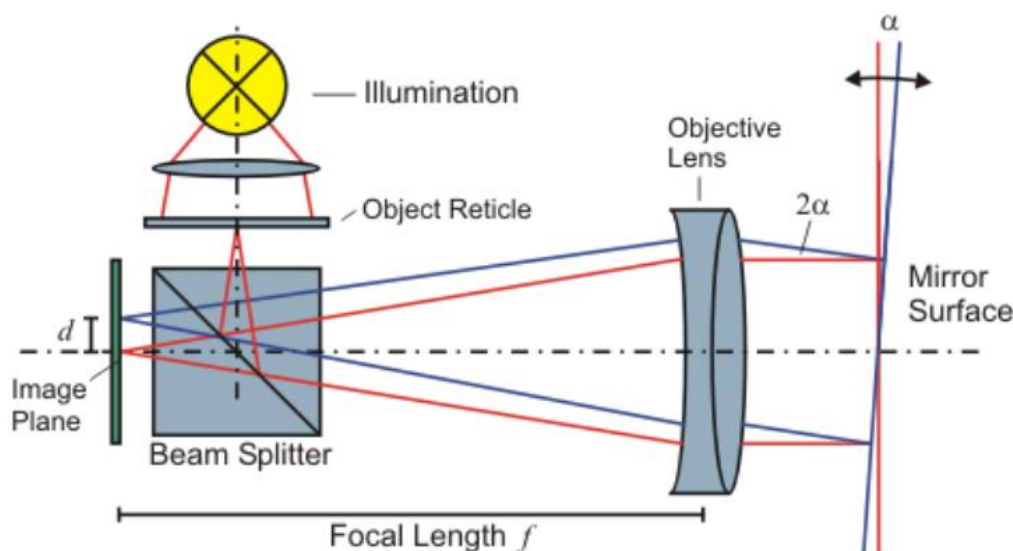


Figura 25- Princípio de um autocolimador [12]

Considerando a figura 25, a imagem do “*Object Reticle*”, quando iluminada, é separada do “*Beam Splitter*” sendo projetada para as lentes objetivas, até ao infinito. A uma certa distância o feixe de luz colimado é refletido de volta a partir de uma superfície espelhada (“*Mirror Surface*”). Se esta superfície espelhada estiver inclinada de um ângulo α relativamente ao eixo ótico, o feixe refletido será projetado para as lentes objetivas com um ângulo de 2α .

Este fenómeno leva a um deslocamento d na imagem no plano da imagem “*Image Plane*”, que pode ser calculado utilizando a distância focal² (f):

$$d = 2 \alpha \cdot f \quad (10)$$

Em conclusão, o ângulo de inclinação da superfície refletora é diretamente proporcional ao deslocamento lateral no plano da imagem. A resolução de um autocolimador aumenta proporcionalmente com a distância focal das lentes objetivas [12].

Um autocolimador deve ser rodado sobre o seu eixo ótico até ao momento em que o reflexo da imagem perpendicular ao seu eixo não produza mudanças de leitura. Idealmente, este instrumento deve ser usado em lugares com poucas correntes de ar no caminho ótico, uma vez que, como produzem mudanças na densidade, provocam movimentos da imagem observada, prejudicando a precisão da medição.

A constituição deste aparelho é apresentada na figura 26. No seu conjunto, é utilizado um feixe (*Beam*) de projeção e um de observação, partilhando do mesmo colimador³(*Collimator*). Ambos os percursos dos feixes são separados utilizando um divisor de feixe (*Beam-splitter*). O objeto para a qual a luz se reflete (*Object Reticle*), é iluminado por um sistema constituído por:

- Fonte de luz apropriada (*Light source*);
- Filtro(*Filter*);
- Condensador(*Condenser*);
- Difusor(*Diffusor*).

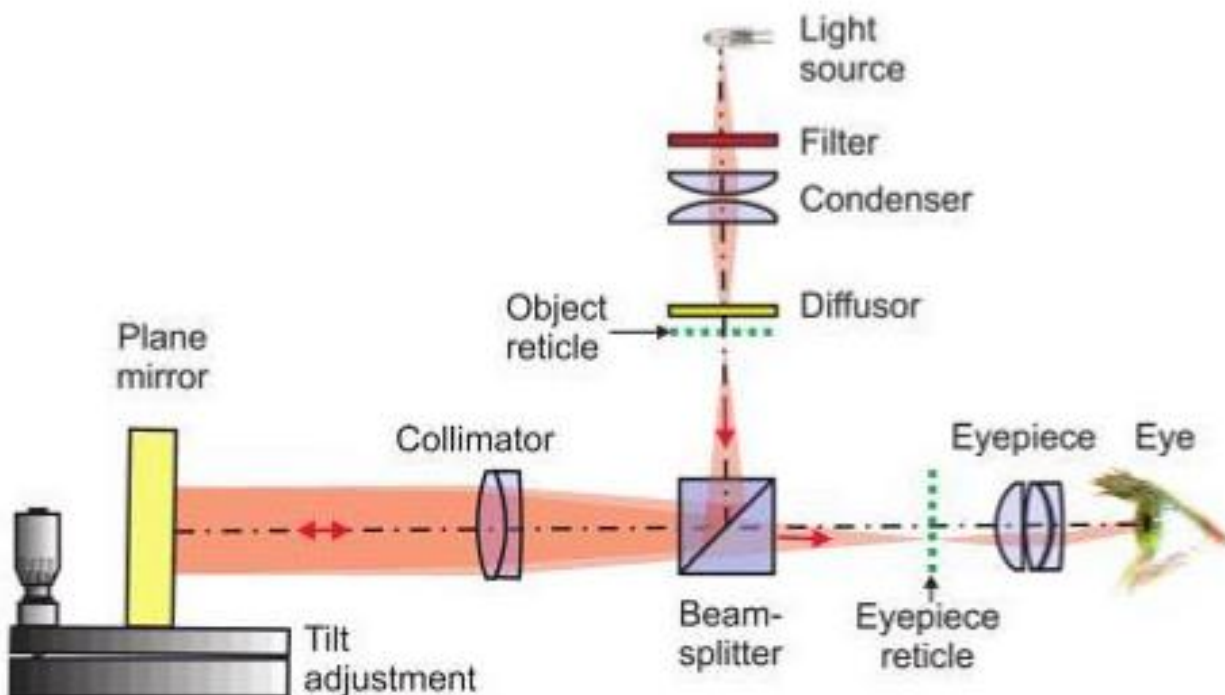


Figura 26- Autocolimador com inspeção visual [11]

² A distância focal é uma característica da construção da lente, e vai influenciar o campo de visão da câmara. Esta consiste na distância entre o centro ótico da lente e o ponto de foco [33].

³ Um colimador, neste contexto, pode ser um espelho curvo ou um conjunto de lentes.

Em sistemas de alta precisão de alinhamento, é essencial uma maior **resolução** do que por meios visuais. Como solução, o **autocolimador eletrônico** permite uma ligação ao computador, para uma análise de alta precisão e recolha automática de medições. Isto é feito através uma câmara com sensores de pixéis discretos, como por exemplo uma câmara CCD (Charged Couple Device) ou CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor). Os princípios deste aparelho são representados na figura 27. Relativamente ao autocolimador de inspeção visual, que permite quantificar ângulos na ordem dos 0.5 segundos de arco, o autocolimador eletrônico consegue ampliar a resolução em mais de 100 vezes [13].

De forma geral, a câmara utilizada permite um varrimento do tipo 2D, permitindo medições angulares em duas direções. É também possível um sensor 1D em casos de apenas 1 eixo, embora seja preferível o varrimento 2D. A câmara digital é conectada a um computador, que calcula o ângulo medido através um software de processamento e análise de imagem. Os resultados obtidos pelo computador garantem uma resolução e precisão consideravelmente maior comparativamente aos que a inspeção visual proporciona.

Devido à precisão e sensibilidade da autocolimação, os autocolimadores eletrônicos são bastante utilizados para medições angulares, monitorizando qualquer movimento angular, ao longo de um determinado intervalo de tempo. Atualmente, já existem autocolimadores servo, que são uma forma compacta de um autocolimador eletrônico, e podem ser utilizados em aplicações de alta velocidade.

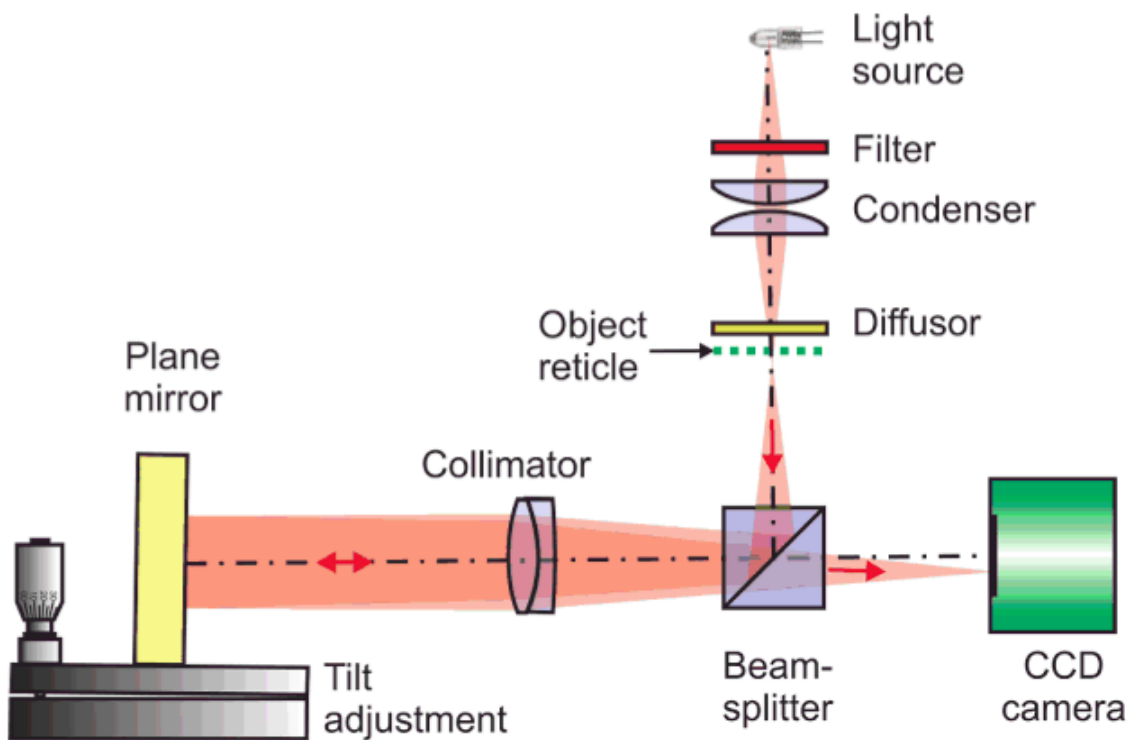


Figura 27- Autocolimador Digital [11]

2.2.2 Nivelamento do C.M.E. na direção Este-Oeste

A montagem do Círculo Meridiano, como referido anteriormente, é feita de tal forma que o eixo central de rotação do instrumento é coincidente com a direção Este-Oeste. O tubo é colocado na *Mira Este*, representada na figura 28. De forma a ajustar e fixar a posição do tubo, utilizam-se quatro parafusos: os dois representados na figura 28, e os outros dois do lado oposto respetivo. Para assegurar que o autocolimador digital se encontra horizontal, nivela-se o eixo com um nível de bolha *Strich Ausschlag*, que tem uma incerteza de 0.02mm por metro, sendo possível realizar um nivelamento com erro inferior a 0,001146 graus.

Ao colocar-se o nível no topo do autocolimador, observa-se a posição da bolha. Em caso de se observar uma inclinação, apertam-se ou desapertam-se os dois parafusos verticais da mira pela qual o tubo passa, até que bolha do nível se encontre centrada.

A posição correta do autocolimador é essencial, na medida em que se existir um erro do seu posicionamento, o nivelamento posterior realizado pelo sistema estará comprometido por esse erro.

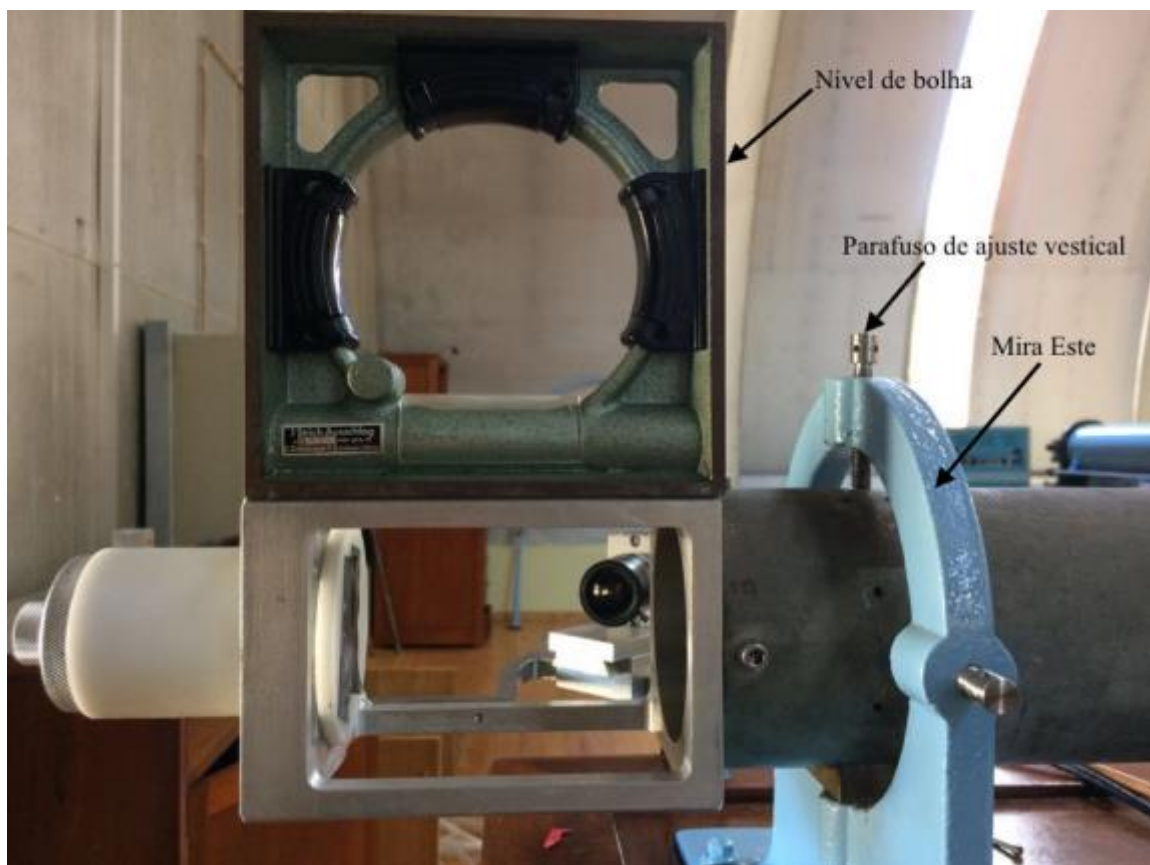


Figura 28-Nivelamento horizontal do Autocolimador Digital com a direção Este-Oeste. Os dois parafusos de ajuste vertical (um em cima e outro em baixo) são apertados/desapertados consoante a leitura do nível de bolha

2.3 Comparação entre Interferometria e Autocolimação

As técnicas de interferometria e a autocolimação têm sido utilizadas para variadíssimas áreas de Engenharia, nomeadamente em nivelamentos e calibrações de ferramentas de máquinas. A interferometria utiliza informação em forma de ondas para medir deslocamentos e inclinações. Como tal, apresenta vantagens como alta linearidade e alta resolução. Como evidenciado na experiência descrita no subcapítulo 2.1.3, a interferometria de Lau associada à leitura de Moiré é um processo sem contacto e capaz de obter resultados com elevada sensibilidade. Contudo, é uma técnica mais complexa, que requer mais tempo de construção do sistema, e uma solução cara.

Em consequência, a autocolimação tem sido cada vez mais utilizada, devido à sua simplicidade, eficácia e menor custo. Consegue atingir a mesma resolução do que a interferometria, em alguns casos até uma maior resolução. Contudo, a precisão da medição executada por um autocolimador pode ser afetada pelo desvio do laser no seu percurso, sendo este fenómeno praticamente inevitável. Uma variação angular entre o feixe de laser e a superfície detetora pode induzir erros consideráveis nas medições efetuadas. Para colmatar este problema, os autocolimadores comerciais utilizam feixes de laser com um diâmetro maior, de forma a reduzir o desvio do feixe de laser e melhorar a estabilidade do sistema [7] .

Uma comparação pertinente entre as duas técnicas é o método de aumento de resolução: na **autocolimação** a resolução melhora aumentando a distância focal, na **interferometria** a resolução melhora aumentando o diâmetro do colimador.

Apesar da pertinência da interferometria, deu-se preferência à autocolimação neste trabalho por várias razões:

- A existência prévia de um autocolimador no C.M.E. oferece facilidade de montagem na medida em que apenas é necessário incorporar o autocolimador eletrónico no local onde o autocolimador visual era posicionado;
- A área de incidência do feixe emitido e refletido é pequena, pelo que não se justifica a interferometria;
- A autocolimação é uma técnica que, aprimorada com a diminuição de incidência de luz exterior, aumento da área do feixe de laser original e utilização de lamelas, já foi utilizada para obter erros submicrométricos, inclusive nanométricos [14];
- É a técnica mais comum para deteção de inclinações angulares em Astronomia.

De uma forma sucinta, a autocolimação é uma técnica que, de uma forma semelhante à interferometria, permite obter resultados de elevada *precisão* e *sensibilidade*. Apesar de não oferecer a mesma *resolução*, utilizando uma câmara CCD monocromática com elevada resolução e uma lamela, consegue-se facilmente compensar essa desvantagem. É um método mais simples, mais barato, e igualmente eficaz. Para além disto, a autocolimação sempre foi associada ao nivelamento de instrumentos astronómicos, pelo que se quis manter o procedimento já utilizado para obter feedback do nivelamento do C.M.E.

3. Definição da Arquitetura do Sistema de Nivelamento

De forma a atingir os objetivos propostos para este trabalho, foram analisados os problemas e desafios existentes. Após um estudo extensivo do funcionamento do Círculo Meridiano de Espelho e uma contextualização astronômica, foram enumerados os problemas a solucionar:

1). Primeiramente, era necessário captar e recolher informação do elemento de feedback. Ou seja, uma vez que o elemento de feedback presente no Círculo Meridiano de Espelho é um autocolimador eletrônico, a primeira preocupação existente foi de analisar e trabalhar com as imagens que a câmara CCD providenciava. Os feixes de laser emitido e refletido teriam que ser identificados e a distância entre eles calculada. A este tratamento de dados foi associada a área de **Processamento de Imagem**. Uma vez que o MATLAB® é um programa com alta capacidade de processamento, intuitivo, e com um conjunto de funções especiais para processamento de imagem, optou-se pela sua utilização.

2). Em segundo lugar, como o objetivo é a minimização do erro, ou seja, a aproximação dos dois feixes de laser, com a informação providenciada pelo processamento de imagem, comunicar-se-ia com os **motores passo-a-passo**, de forma a corrigir o erro. Isto é, idealmente, em cada *frame* que a câmara gerava, a distância entre os dois feixes de laser é calculada e traduzida para um comando a ser emitido para cada motor, de forma a corrigir esse erro. A comunicação a ser estabelecida seria uma comunicação série **RS-485**.

De uma forma sucinta, este trabalho pode ser associado a duas componentes: (1) Processamento de Imagem; (2) Comunicação série com Motores Passo-a-Passo.

3.1 Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema encontra-se representada na figura 29. O autocolimador, através da câmara, é responsável pelo feedback do sistema. A imagem é processada no PC, através do software MATLAB® que determina se a distância entre os dois feixes de laser é submicrométrica. Em caso contrário, é estabelecida a comunicação série com os motores passo-a-passo através de portas série, alterando-se a posição do espelho do C.M.E.

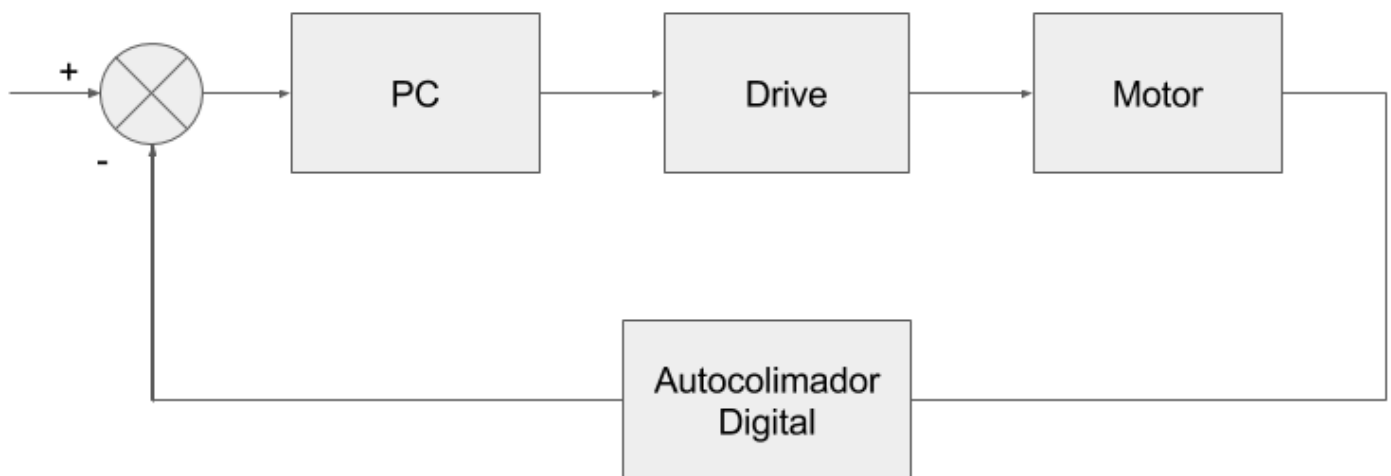


Figura 29- Representação do Sistema de Controlo

3.2 Cálculo do Binário necessário

Aquando do início deste trabalho, o OAUP já havia feito a encomenda de dois motores passo-a-passo com o binário de 5.94Nm. Cada motor encontra-se inserido num sistema de transmissão que tem como função elevar, suportar e descer uma carga de 200kg. Neste sistema, a rotação dos motores passo-a-passo provoca a rotação de um veio que se encontra roscado numa castanha mecânica. Esta castanha tem um perfil de rosca **ISO** triangular. A rotação provoca um movimento de subida e descida, consoante o sentido de rotação dos motores.

Tendo em conta dinâmica deste sistema, torna-se necessário calcular o **binário necessário** para efetuar este movimento. Primeiramente, estabelece-se as equações para um perfil de rosca quadrado, e, no final, é considerado o ângulo que a rosca triangular possui, que altera as componentes da força atrito e, desta forma, do binário necessário. No caso da rosca utilizada no sistema de transmissão do C.M.E., o ângulo é de 60°. São também feitas outras considerações que alteram o valor do binário necessário, tal como o coeficiente de segurança deste sistema.

Na figura 30 está representado um parafuso com um perfil de rosca quadrado, de diâmetro d_m , um passo p , um ângulo de avanço λ , e um ângulo de hélice Ψ , sujeito a uma força axial F . O objetivo desta análise consiste em determinar uma expressão para o binário requerido para elevar e descer uma carga [15].

De forma a fazê-lo, imagina-se um fio da rosca desenrolado numa volta completa. O extremo do fio forma a hipotenusa de um triângulo retângulo cuja base é a circunferência e altura o passo. A figura 31 representa o triângulo descrito. Neste triângulo representa-se o somatório de todas as forças que atuam no fio. Para elevar a carga, a força P_R atua para a direita (*R-Right*), contrariamente à situação de descida da carga, onde P_L (*L-Left*) atua para a esquerda.

A força de atrito f é o produto do coeficiente de atrito f pela força normal N e atua contra o sentido de rotação.

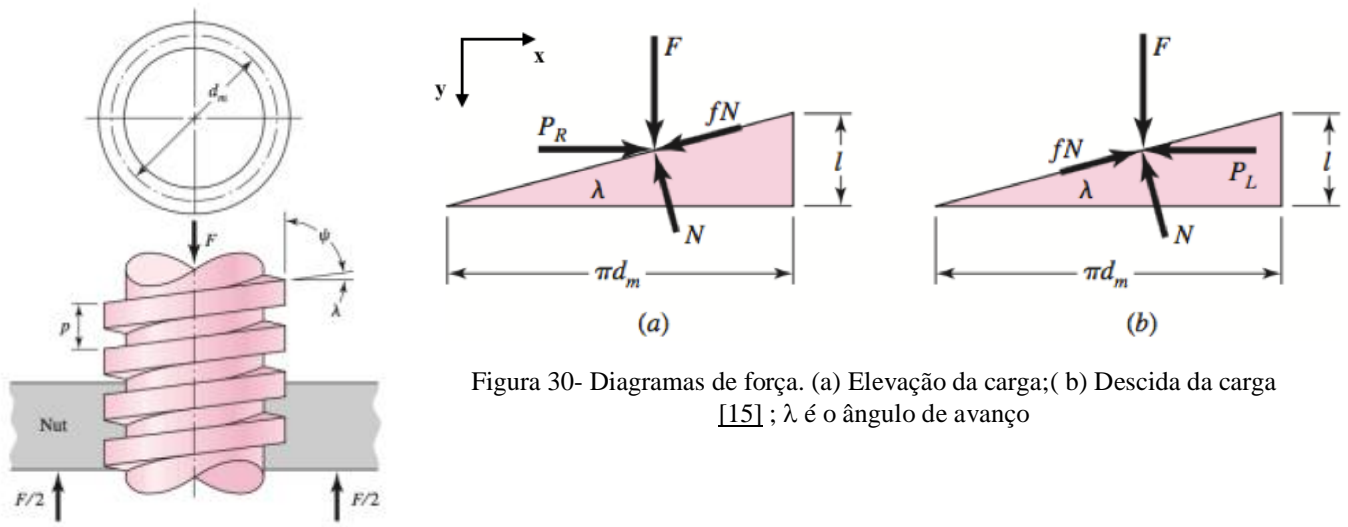


Figura 30- Diagramas de força. (a) Elevação da carga; (b) Descida da carga [15]; λ é o ângulo de avanço

Figura 31- Parafuso de rosca quadrada, sujeito a uma força F axial de compressão [15]

Uma vez que o sistema se encontra em equilíbrio sobre a ação destas forças, é possível determinar um conjunto de equações para a subida e descida do parafuso, considerado o referencial presente na figura 31.

Na subida:

$$\sum F_H = P_R - N \sin \lambda - fN \cos \lambda = 0 \quad (11)$$

$$\sum F_V = F + fN \sin \lambda - N \cos \lambda = 0 \quad (12)$$

Na descida:

$$\sum F_H = -P_L - N \sin \lambda + fN \cos \lambda = 0 \quad (13)$$

$$\sum F_V = F - fN \sin \lambda - N \cos \lambda = 0 \quad (14)$$

Como a força normal não interfere no cálculo do binário, esta é eliminada do sistema de equações.

Resolvendo o sistema de equações chega-se às seguintes equações:

Na subida:

$$P_R = \frac{F(\sin \lambda + f \cos \lambda)}{\cos \lambda - f \sin \lambda} \quad (15)$$

Na descida:

$$P_L = \frac{F(f \cos \lambda - \sin \lambda)}{\cos \lambda + f \sin \lambda} \quad (16)$$

Ao dividir-se o numerador e o denominador por $\cos \lambda$ e usando relação **$\tan \lambda = l/\pi d_m$** , em que l é o avanço por volta, obtêm-se as seguintes equações:

$$P_R = \frac{F\left[\left(\frac{l}{\pi d_m}\right) + f\right]}{1 - (fl/\pi d_m)} \quad (17)$$

$$P_L = \frac{F\left[f - \left(\frac{l}{\pi d_m}\right)\right]}{1 + (fl/\pi d_m)} \quad (18)$$

Uma vez que **$T = P \cdot d_m/2$** ,

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) \quad (19)$$

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + f l} \right) \quad (20)$$

onde T_R e T_L são necessários por dois motivos: para ultrapassar o atrito existente no fio do parafuso e para levantar ou descer a carga, respetivamente.

No entanto, como indicado no início deste subcapítulo, é necessário ter em consideração alguns fatores presentes no sistema de transmissão do C.M.E.:

- O conjunto de equações descritas neste subcapítulo são para um perfil de rosca quadrado. No caso de se considerar outro tipo de roscas, a carga encontra-se inclinada relativamente ao eixo da rosca, devido ao ângulo da rosca, que aumenta a força de atrito. Consequentemente, as equações 18 e 19 têm que ser alteradas, dividindo-as por $\cos(\alpha)$, ou seja, multiplicando por $\sec(\alpha)$, em que $\alpha = 30^\circ$.
- O fuso presente no sistema de transmissão é irreversível, pelo que o binário na descida (T_L), é positivo. Esta irreversibilidade é necessária no C.M.E. para garantir o que o sistema não cai quando os motores passo-a-passo são desligados.
- É necessário avaliar o coeficiente de segurança efetivo. O coeficiente de segurança efetivo(n) depende da aplicação e do tipo de implicações que esta sugere. Tendo em conta que se trata de um sistema mecânico estrutural, com um peso de aproximadamente 4000N, e um valor histórico considerável, foi adotado um coeficiente de segurança efetiva de 3.

Considerando o ângulo de rosca, e o coeficiente de segurança, as equações 18 e 19 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) \cdot n \quad (20)$$

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - l \sec \alpha}{\pi d_m + f l \sec \alpha} \right) \cdot n \quad (21)$$

A coeficiente de atrito f é relativo, no presente caso, ao contacto entre bronze e aço lubrificado numa rosca (Figura 32).

Screw Material	Nut Material			
	Steel	Bronze	Brass	Cast Iron
Steel, dry	0.15–0.25	0.15–0.23	0.15–0.19	0.15–0.25
Steel, machine oil	0.11–0.17	0.10–0.16	0.10–0.15	0.11–0.17
Bronze	0.08–0.12	0.04–0.06	—	0.06–0.09

Figura 32- Coeficiente de Atrito para Roscas [15]

Assumiu-se o maior coeficiente de atrito (0,16) para o cálculo do binário. Substituindo as variáveis por: $F= 2000\text{N}$; $d_m=30\text{mm}$; $f= 0.16$; $l=1\text{mm}$; $n=3$, $\alpha =30^\circ$, chega-se aos seguintes valores para o binário de subida e de descida:

- $T_R = 17,62 \text{ Nm}$
- $T_L = 13,27 \text{ Nm}$

Uma vez que o binário disponível por cada motor é apenas de $5,94\text{Nm}$, foi necessário comprar um redutor para cada motor. Uma vez que era obrigatório a encomenda de dois redutores, optou-se por uns com a capacidade de redução 8:1, de forma a prevenir um coeficiente de segurança efetiva maior do que a considerada. O redutor considerado é planetário, de 1 andar, de rendimento 97%.

3.3 Sistema Eletromecânico

Neste subcapítulo é abordada a disposição do sistema, assim como os componentes que dele fazem parte. Os elementos mais pertinentes são abordados individualmente, e devidamente explicados.

3.3.1 Disposição do Sistema

Os dois motores passo-a-passo estão inseridos nos cilindros onde previamente o mercúrio se encontrava. Contudo, um deles, denominado de **Motor 2**, é apenas utilizado para assegurar o engrenamento da roda do eixo do C.M.E. com o motor passo-a-passo responsável por fazer rodar o instrumento. Ou seja, após um processo de inicialização que será explicado no capítulo 6, o motor 2 fica imóvel.

O outro motor, denominado de **Motor 1**, é responsável pelo nivelamento do C.M.E., através de deslocamentos verticais. Este apenas permite variar a posição do feixe de laser segundo a direção, uma vez que apenas atua verticalmente no eixo. Os dois motores encontram-se representados na figura 33.



Figura 33- O Motor 2 assegura o engrenamento da roda do Eixo Central. O Motor 1 é responsável pelo nivelamento submicrométrico

3.3.2 Componentes

Neste subcapítulo são apresentados os componentes que fazem parte do sistema eletromecânico. É introduzido o sistema de transmissão projetado para converter as rotações do motor passo-a-passo em translação vertical do eixo do C.M.E. Neste sistema, estão contemplados o fuso, os motores, encoders e redutores. As drives, fonte de alimentação, PC e autocolimador são também apresentados.

1) Sistema de Transmissão de movimento

De forma a converter a rotação dos motores passo-a-passo numa translação vertical do Círculo Meridiano, foi necessária a construção de um sistema mecânico de transmissão. Tal como os cilindros hidráulicos, que estavam inseridos nos suportes das munhoneiras, em cada um destes suportes está inserido um sistema mecânico, que se encontra representado na figura 34. O seu modelo SW encontra-se nas figuras 35 e 36 em modelos SW, projetados pelo Eng. Bernardo Relvas.



Figura 34- Sistema de Transmissão do novo sistema de nivelamento do C.M.E.

Quando o motor executa um determinado número de passos, o redutor diminui a velocidade e, consequentemente, aumenta o binário disponível de saída. O conjunto **Motor+Redutor** é acoplado ao fuso pelo acoplamento representado na Figura 36 pela letra 5, que assegura a transmissão de movimento. Este fuso, representado na parte esquerda da figura 38, é constituído por uma rosca ISO triangular de passo de 1mm que, quando se encontra em rotação, provoca uma translação vertical da castanha mecânica representada pela letra D na figura 35. Esta castanha encosta nos pratos das munhoneiras, provocando a sua subida ou descida. Este contacto entre a castanha mecânica e a munhoneira encontra-se representada na figura 37.

Na placa representada pela letra *C* (Figura 35), encontra-se um fim-de-curso(micro-switch) responsável por indicar que o eixo do C.M.E. não pode descer mais, tendo atingido a sua cota mais baixa. Este micro-switch é ativado por toque, que se sucede quando a castanha desce e o seu prato de encosto pressiona o sensor.

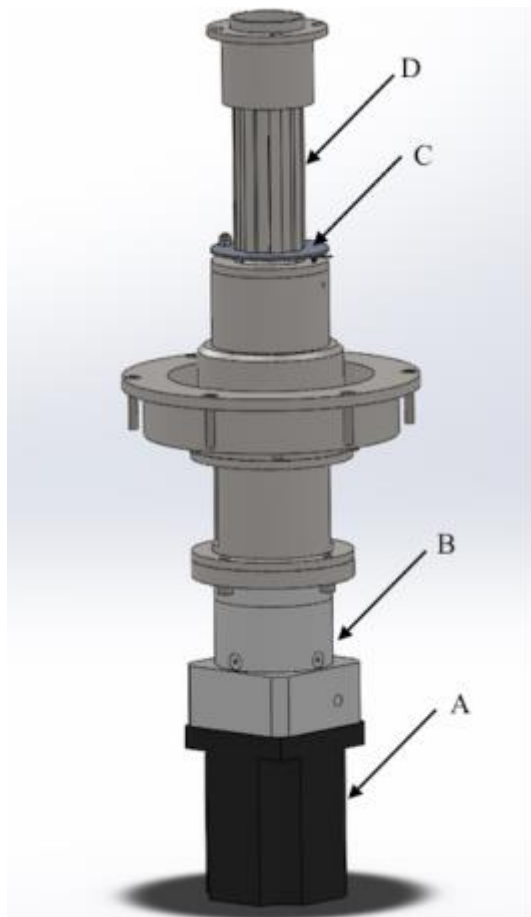


Figura 35- Modelo SW do sistema de Transmissão de rotação em Translação Linear. **A**-Motor passo-a-passo; **B**-Redutor 8:1; **C**- Placa portadora de um MicroSwitch; **D**- Castanha mecânica

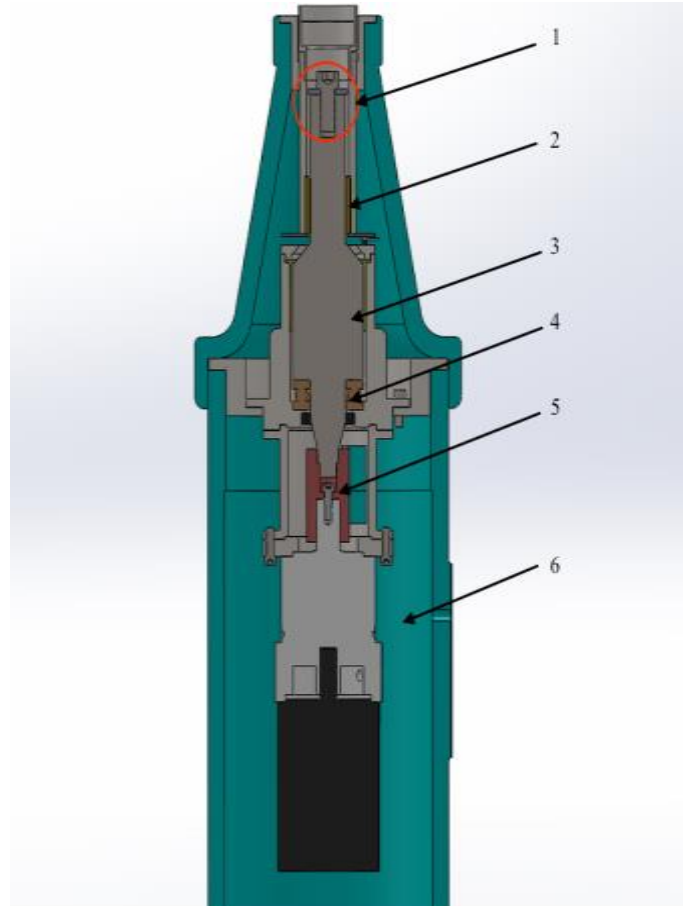


Figura 36-Modelo SW do Corte do Sistema de Transmissão representado na Figura 33. **1**-Parafuso e Anilha de aperto; **2**-Casquilho; **3**-Fuso; **4**-Rolamento de esferas; **5**-Acoplamento do conjunto Motor e Redutor + Fuso; **6**- Suporte da munhoneira, em ferro fundido



Figura 37- Contacto entre castanha e munhoneira

- **Fuso e Castanha mecânica**

O fuso é feito em aço cromoníquel, responsável por transmitir o movimento de rotação à saída do redutor numa translação vertical. Neste fuso, foi maquinada uma rosca ISO triangular esquerda, irreversível, de modo a que, em caso de falha dos motores, o sistema não caia. Quando o redutor efetua um movimento de rotação, o fuso roda também, provocando um movimento de subida ou descida na castanha, consoante o sentido de rotação.

De forma a prevenir que a castanha mecânica se solte do fuso, foram adicionados um parafuso de rosca direita e uma anilha de aperto, para que a anilha, solidária com o movimento do fuso, provoque um movimento de rotação no parafuso, no seu sentido de aperto, funcionando como um travão.

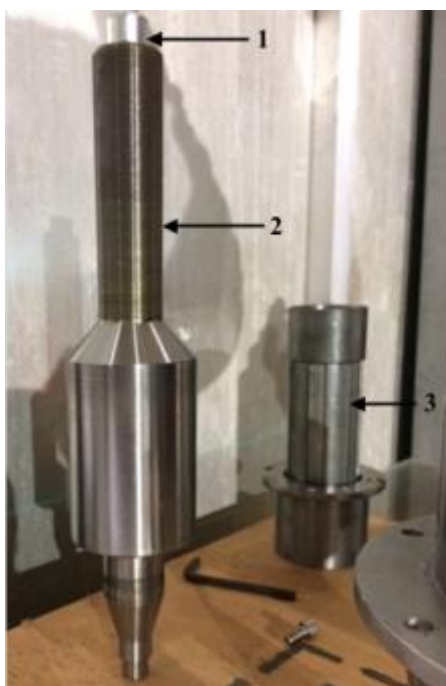


Figura 38- (1)- Parafuso de Aperto; (2) - Fuso; (3) -Castanha mecânica

- **Redutor**

O redutor utilizado tem a referência de **GPLE80-1-S-8-F87**, e foi encomendado à mesma marca que os motores passo-a-passo (*Nanotec*). É um redutor planetário, de 1 andar, e de rendimento 97%. Tem uma **capacidade de redução de 8:1** e um *backlash* de <7 minutos de arco. Com a utilização deste redutor, aumenta-se a resolução 8 vezes [16]

- **Motor passo-a-passo e Encoder**

Um motor passo-a-passo (*Stepper Motor*) é um motor DC síncrono que transforma impulsos elétricos em movimentos mecânicos precisos. Movem-se em passos discretos e são constituídos por grupos de enrolamentos denominados de **fases**. Ao energizar cada fase sequencialmente, o motor roda um determinado ângulo, o “passo”. Têm a particularidade de conseguir gerar um elevado binário a uma baixa velocidade [17].

A escolha de um motor passo-a-passo para ser integrado no sistema eletromecânico adveio de algumas razões que seguidamente se enumeram:

- Uma vez que o sistema é lento, ou seja, o C.M.E. não atinge velocidades elevadas na rotação, e extremamente pesado (O eixo central do C.M.E. distribui 200kg para cada lado), era necessário um motor que disponibilizasse um alto binário em velocidades baixas. À velocidade nula o motor disponibiliza binário máximo (excelente para quando o sistema se encontra em *stand-by*);
- O motor passo-a-passo tem elevada precisão de posicionamento, algo indispensável para o nivelamento;
- O controlo é simples e barato;
- Compatível com técnicas digitais;
- Requerem pouca manutenção.

Neste trabalho foram utilizados dois motores passo-a-passo, um em cada cilindro onde o mercúrio previamente se encontrava.

O motor passo-a-passo utilizado neste trabalho é da marca Nanotec, com a referência **ST8918M6708-A** (*A-Single shaft*: uma ponta de um veio), representado na figura 39. É um motor de **2 fases**, que, funcionando em *Full Step* tem uma resolução de **1.8°/passo**. O seu binário máximo é disponibilizado à velocidade mínima sendo este **5.94Nm**(Figura 40). A “data sheet” deste motor encontra-se no anexo A2. Estes motores têm a particularidade de já neles serem inseridos encoders. Os encoders utilizados foram o NOE2-24-B06, de 1000 linhas, e o NOE2-05-K14 de 4000 linhas, ambos incrementais [18]. Optou-se pela utilização de dois encoders diferentes, de modo a obter uma maior resolução no motor responsável por efetuar os ajustes micrométricos.

Quanto à sua montagem elétrica, foi necessário decidir a forma de ligação dos enrolamentos motor passo-a-passo: *Série* ou *Paralelo*.

Optou-se por adotar a montagem em Série, uma vez que esta forma de montagem permite ao motor passo-a-passo disponibilizar **maior binário** com menor corrente.



Figura 39- Motor Passo-a-Passo ST8918M6708-A [18]

ST8918M6708

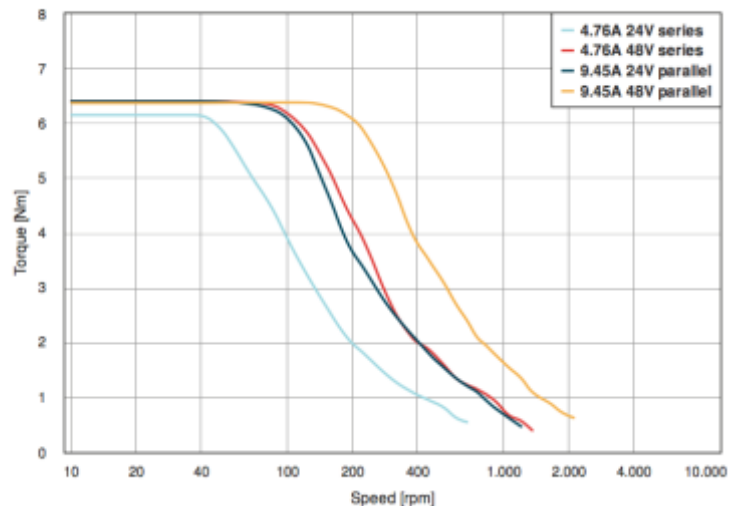


Figura 40- Curva Binário-Velocidade do motor utilizado. A curva azul (4.76A 24V series) é respectiva aos motores passo-a-passo utilizados [18]

Para deslocamentos angulares e velocidades bastante pequenas, utilizou-se o **microstepping**, que é uma técnica que apresenta um conjunto de benefícios: (1) aumento da resolução posicional; (2) quando operado a baixas velocidades, o microstepping diminui o efeito de “torque ripple”(percentagem da diferença entre o torque máximo e mínimo), e permite rodar de uma posição para outra mais suavemente; (3) diminui os problemas de ressonância comuns aos motores passo-a-passo [19]. Contudo, o microstepping diminui o binário disponível à saída.

Neste trabalho, utilizou-se o motor passo-a-passo em dois modos de operação: (1) Full Step e (2) **Microstepping**. Para movimentos na ordem dos centímetros e milímetros utilizou-se o primeiro método. Quando os dois feixes de laser se encontram muito próximos, é utilizado o microstepping.

2) PC

O computador utilizado foi um DELL com 16GB de RAM, sistema operativo Windows 10 de 64 bits, e processador Intel® Core™ i5-4960 CPU @ 3.50GHz. Era necessário a utilização de um computador com uma memória RAM significativa para serem efetuadas operações de processamento de imagem.

3) Drives e Fonte de Alimentação

Utilizaram-se duas drives SMCI47-S2 (Figura 41) para controlar os motores passo-a-passo. Estas drives permitem controlo em malha fechada, com comutação sinusoidal a partir do encoder. No anexo A3 encontra-se a “data sheet” referente a esta drive.

De forma a poder comunicar com cada drive individualmente, é necessário atribuir um endereço (*module address*) a cada drive. Isto é feito a nível de *hardware* com dois interruptores hexadecimais codificados [20]. O primeiro dígito é atribuído com o interruptor à esquerda, e o segundo no interruptor à direita (Figura 42).

A fonte de alimentação utilizada tem a referência PRO ECO 480W 24V 20A e é da marca *Weidmuller* [21]. É uma fonte de 480W, que disponibiliza uma tensão DC 24V. Se necessário, a tensão pode ser ajustável entre 22-24V. Tem uma corrente máxima de saída de 20A.



Figura 41- Drive SMCI47-S2



Figura 42- Atribuição do module address da drive SMCI47-S2. No interruptor à esquerda, é atribuído o primeiro dígito, e no interruptor à direita o segundo dígito

4) Autocolimador Digital

Neste trabalho, foram utilizados os conceitos de um autocolimador digital para a construção de um aparelho semelhante. Este encontra-se representado na figura 43 e os seus componentes encontram-se legendados da seguinte forma:

- A- Câmara CCD
- B- Porta-Lamela em latão e Lamela
- C- Estrutura em alumínio
- D- Laser: Utilizou-se o laser Howie Glatter, de 535Nm de comprimento de onda.

Neste caso, como se utiliza um feixe de laser em vez de uma luz branca, o filtro, condensador e difusor mencionados no subcapítulo 2.2.1 “*Princípios de um Autocolimador*” não são necessários, uma vez que o laser já possui as características inerentes a esses processos. O feixe de laser é enviado na direção do espelho do C.M.E., que foi desenhado de forma a que, em qualquer altura da sua rotação, exista sempre uma superfície refletora ao eixo do feixe. O feixe é enviado pelo tubo ao qual o autocolimador se encontra preso pelos parafusos (Figura 43). Este tubo protege o feixe emitido de interferências exteriores, tais como correntes de ar e variações de luz.

Quando o feixe encontra a superfície plana do espelho central, é refletido de volta, idealmente, ao longo do mesmo percurso. Se houver uma inclinação do espelho, o feixe será refletido numa direção diferente da de emissão, e será projetado na lamela a uma certa distância do ponto original. No início do trabalho, este fenômeno foi verificado: aquando da rotação do eixo do C.M.E., era possível observar dois pontos na lamela, pelo que foi necessário corrigir essa discrepância.



Figura 43- Autocolimador Digital do C.M.E.

A utilização da **lamela** no autocolimador foi utilizada para se conseguir visualizar, mais nitidamente, os dois feixes de laser quando se encontram sobrepostos. No alvo original, existe um fenômeno no qual é criada uma “nuvem” de pontos, que prejudica a nitidez. Na figura 44 é possível observar esta nuvem no alvo original, de brilho ligeiramente mais ténue do que os feixes de laser. Na lamela, esta nuvem não é observada, pelo que é possível visualizar os dois feixes mais nitidamente e, consecutivamente, obter melhores resultados no processamento da imagem.

Na figura 44, o sistema de coordenadas encontra-se representado, no qual os deslocamentos verticais são medidos no **eixo y**, e os deslocamentos horizontais no **eixo x**.

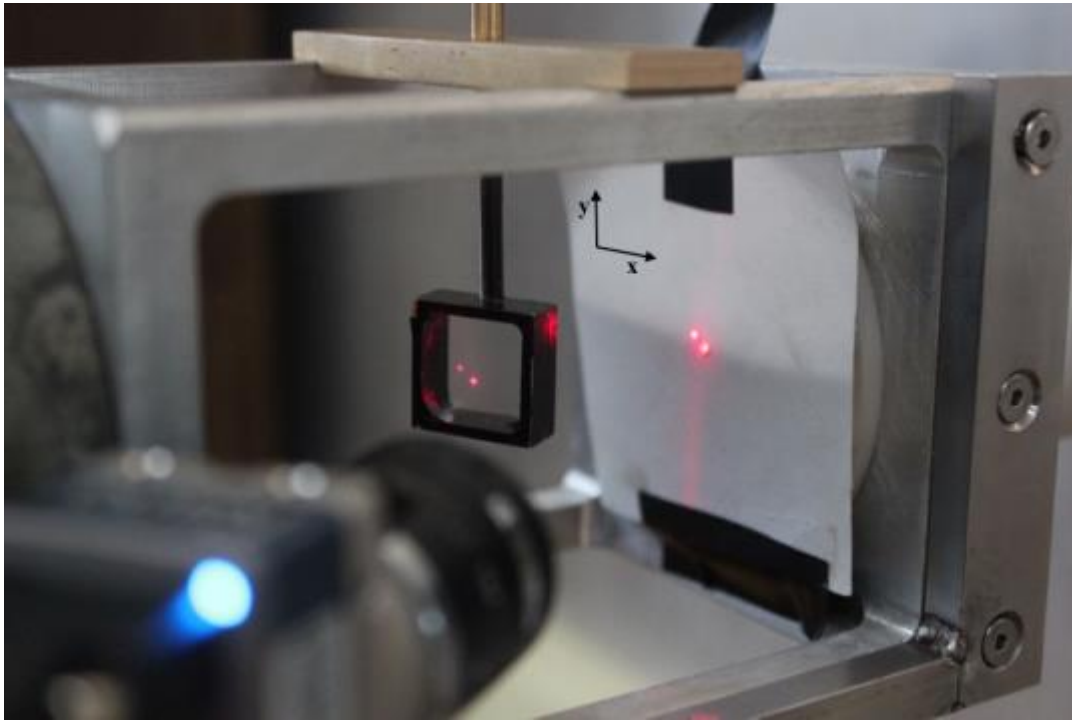


Figura 44- Pormenor dos dois feixes de laser, vistos na lamela ou no alvo original. O eixo de coordenadas encontra-se representado no canto superior esquerdo

A câmara utilizada foi a **Genie Nano M2020 Mono**. As suas características são as seguintes:

- Sensor monocromático Sony Pregious IMX265 3.2M com uma resolução de 2048x 1536;
- Taxa de aquisição máxima (Max Frame Rate) de 55 frames por segundo;
- O adaptador utilizado é o GigE Vision;
- O tamanho do pixel é 3.45 μm .

Para a escolha da câmara, deu-se prioridade a uma alta resolução, de forma a ampliar a resolução do sistema e, consequentemente, a sensibilidade e a precisão de medição. A resolução de uma câmara define quantos pixéis individuais estão disponíveis para serem captados numa determinada área de trabalho. Normalmente, esta resolução é dada em *megapixéis*, indicando quantos milhões de pixéis estão no sensor da câmara que é usada para registar o momento. Teoricamente, quanto mais megapixéis a câmara disponibilizar, mais informação está a ser registada na imagem. Praticamente, quanto maior a resolução, maior o tamanho que uma imagem pode ser reproduzida [22]. A objetiva utilizada é da marca GOYO OPTICAL, e tem uma distância focal de 6mm, e uma gama Íris de 1.4-16.

5) Encoder de Ligação de Sistemas

O encoder representado na figura 45 tem a referência **G0355025C382** e é um produto vendido pela *Baumer* [23]. Este encoder é incremental, de 32768 linhas, e encontra-se incorporado no sistema de rotação do C.M.E. em contacto com uma das rodas do eixo central. O encoder é responsável para medir a posição do eixo. Este sistema já se encontrava presente no Círculo Meridiano antes da realização deste trabalho. A sua funcionalidade é averiguar o correto posicionamento do C.M.E., enviando para um sistema de controlo programado em Arduino informações da posição do eixo.

Neste trabalho, utiliza-se este encoder para determinar se o eixo principal do C.M.E. se encontra em rotação ou em repouso, pelo que lhe foi atribuído o nome “encoder de ligação de sistemas”. O sinal é enviado pelo Arduino, por uma porta série, para o *MATLAB*®. Isto é pertinente por motivos que serão explicados no capítulo 6, onde é descrito o funcionamento do programa desenvolvido neste trabalho.



Figura 45- Encoder responsável pelo feedback de rotação do eixo central do C.M.E.

3.3.2 Ligações Elétricas

O circuito elétrico do sistema está representado na figura 46. Neste, as ligações estão numeradas de modo a serem facilmente identificadas.

- **Ligação 1-** G3-ACBL-EVALKIT | Ligação à corrente
- **Ligação 2-** G3-AIOC-BLUNT2M | Ligação Ethernet com o PC
- **Ligação 3-** ZK-RS485-USB: divide-se para as duas drives. Esta ligação encontra-se explícita no anexo A1.
- **Ligação 4 e 5-** Ligação +24V, Ground
- **Ligação 6 e 7-** A ligação da drive ao motor depende do tipo de montagem do motor e foi consultada no catálogo da drive utilizada. A ligação encontra-se descrita neste capítulo.
- **Ligação 8 e 9-** A ligação do encoder à drive foi consultada no catálogo da drive e encontra-se descrita neste capítulo.

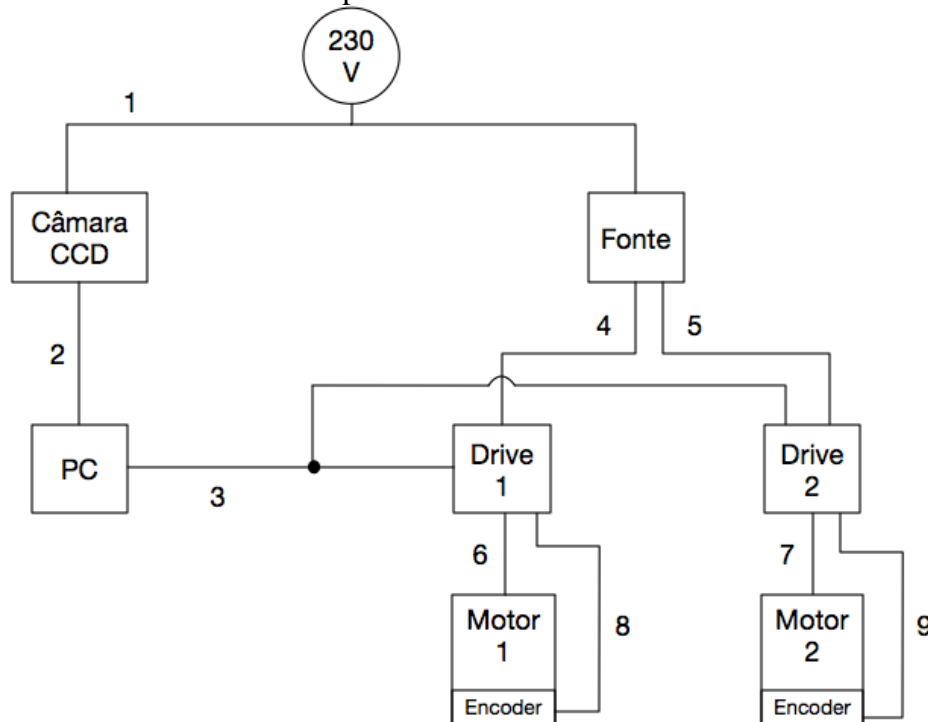


Figura 46- Esquema das ligações entre os componentes do sistema de nivelamento

3.3.3 Ligação Drive-Motor (Ligação 6 e 7)

Uma vez que a montagem do motor passo-a-passo é feita em série (esta montagem encontra-se explicada no subcapítulo, onde se introduz o motor passo-a-passo utilizado), consultou-se o catálogo do *Motor ST8918M6708-A* de forma a estabelecer a ligação elétrica correta. A figura 47 apresenta as ligações estabelecidas.

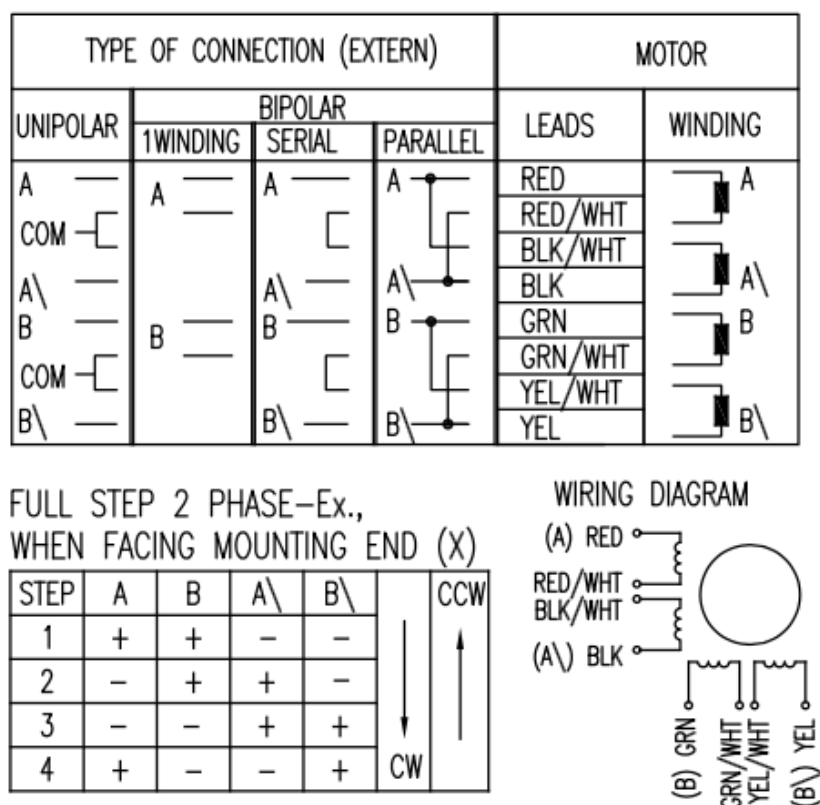


Figura 47- Esquema elétrico da ligação da drive ao Motor passo-a-passo ST8918M6708-A

3.3.2 Ligação Drive-Encoder (Ligação 8 e 9)

Esta ligação é feita através do cabo ZK-NOE1-10-500-S e encontra-se representada na figura 48.

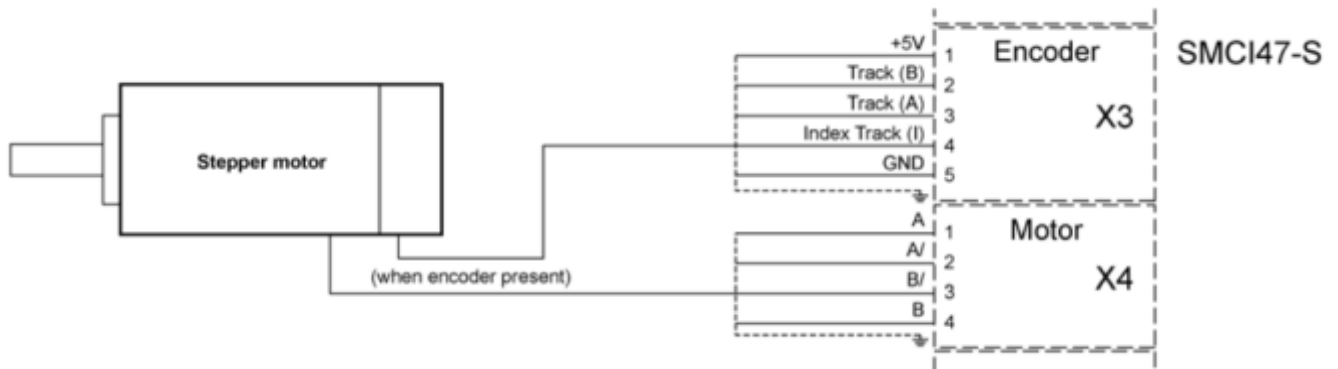


Figura 48- Esquema elétrico da ligação do motor à drive SMCI47-S (não é especificado se é a Drive S2 ou S3, uma vez que a ligação é igual) [20]

3.3.3 Ligação PC- Drives (Ligação 3)

A ligação do PC às duas drives é estabelecida pelo cabo ZK-RS486-USB, cuja distribuição de pinos se encontra descrita na figura 49.

Pin assignment connector X6: RS485 interface

Pin no.	Name	Observations
1	NC	Not assigned
2	Rx+	RS485 Rx+
3	+5 V	Output +5 V
4	Tx+	RS485 Tx+
5	NC	
6	NC	
7	Rx-	RS485 Rx-
8	GND	Output GND (0 V)
9	Tx-	RS485 Tx-

Figura 49- Atribuição dos Pins do Cabo ZK-RS485-USB [20]

3.3.4 Ligação Câmara- PC (Ligação 1)

Para estabelecer a ligação da câmara ao PC foi necessário utilizar o cabo G3-AIOC-BLUNT2M. Como era necessário estabelecer ligações elétricas, consultou-se o catálogo da câmara Genie M2020 [24]. A figura 50 representa o esquema elétrico das ligações.

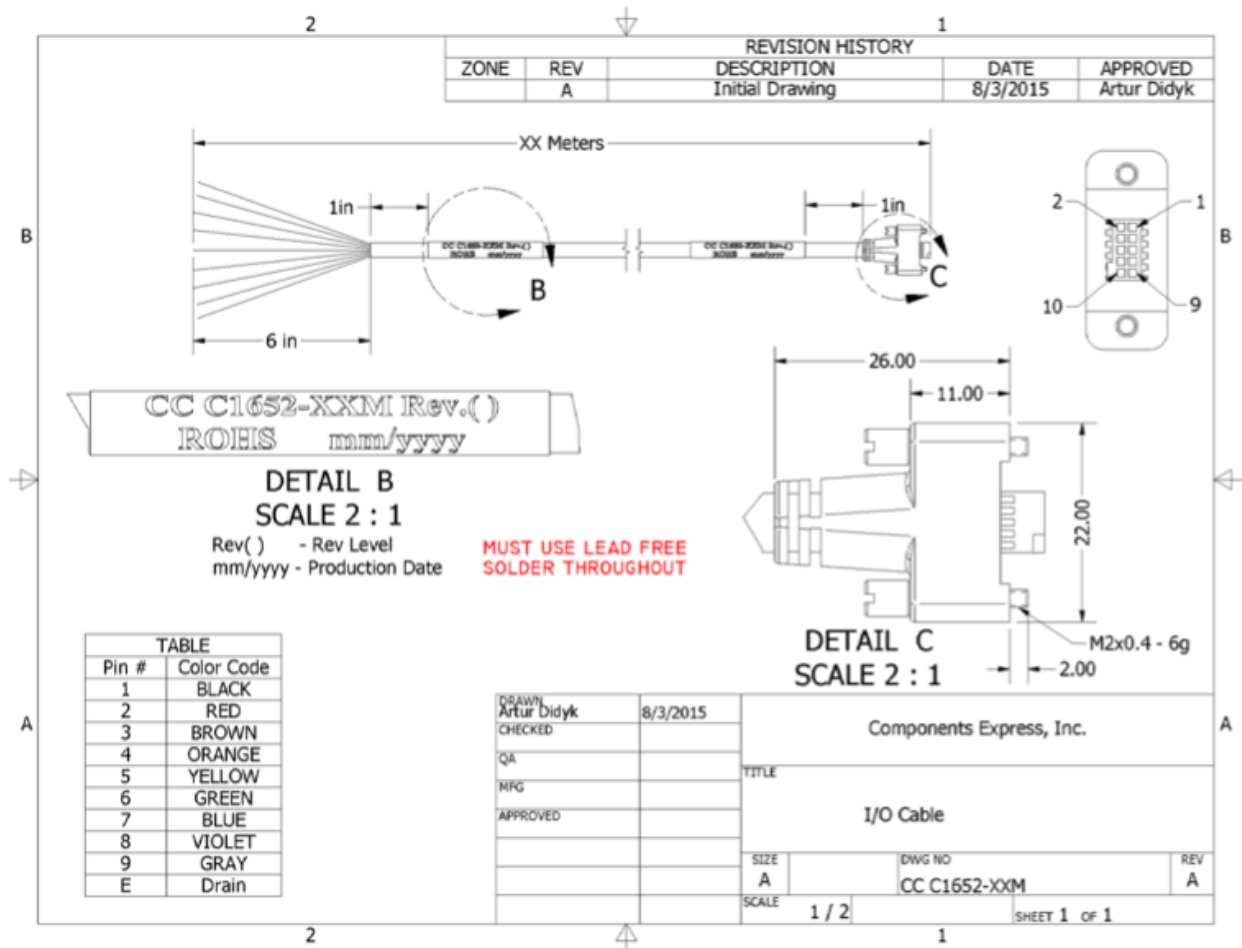


Figura 50- Atribuição dos Pins do cabo G3-AIOC-BLUNT2M [24]

4. Processamento de Imagem

Após definida a arquitetura do sistema, e os componentes a serem utilizados, procedeu-se ao desenvolvimento de um algoritmo de processamento e análise de imagem. Após alguma pesquisa, optou-se pela utilização da versão 2014 do *MATLAB*[®] para o processamento da imagem, através da *Image Processing Toolbox*, uma coleção de funções que permitem o seu fácil manuseamento, de uma forma compacta e intuitiva. Devido à simplicidade que esta ferramenta oferece, o *MATLAB*[®] é considerado um software ideal para problemas de processamento de imagem.

Utilizando a câmara presente no autocolimador, é feita uma ligação ao PC e, criando um algoritmo de processamento de imagem, é possível detetar e calcular os centróides do feixe de laser emitido e do feixe de laser refletido.

Antes de se proceder à escrita do programa, foi feito um levantamento dos conceitos elementares da área em questão (subcapítulo 4.1).

Na figura 51 é apresentado um “*screenshot*” do ecrã do PC, aquando da utilização do algoritmo de processamento de imagem. Os dois feixes encontram-se representados, assim como a janela do *MATLAB*[®], onde é possível observar o resultado da distância entre os dois pontos detetados.

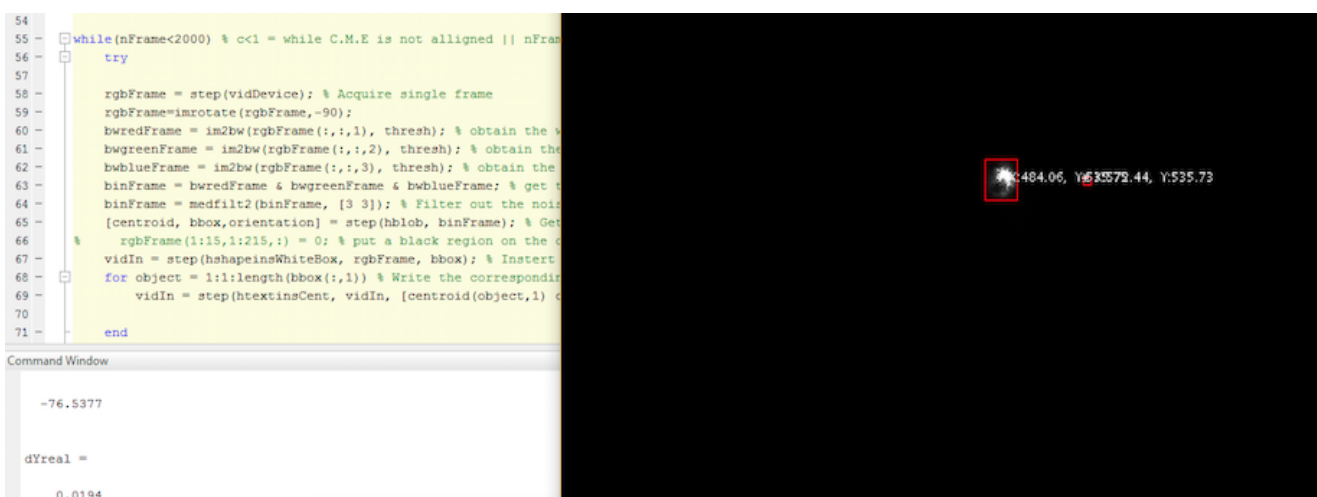


Figura 51- Detecção de dois pontos e cálculo da sua distância no eixo y, através do algoritmo desenvolvido neste trabalho

4.1 Introdução

O processamento da imagem digital refere-se ao processamento de análise de uma imagem por meios computacionais [25]. Atualmente, o processamento de uma imagem é normalmente feito através de um computador, substituindo os aparelhos eletrónicos e óticos. Isto é possível utilizando softwares como o MATLAB®, ou o Simatic Spectation® (software desenvolvido pela SIEMENS), ferramentas importantes de computação numérica.

Neste trabalho, o método de avaliação do nivelamento do eixo do C.M.E. é através de uma câmara CCD apontada para uma lamela, na qual é possível identificar o feixe de laser de origem e a sua reflexão. De forma a detetar e a calcular a distância entre eles, é necessário adquirir imagens consecutivas, executar uma série de processos de melhoramento de imagem, e utilizar a ferramenta ***Blob Analysis*** para detetar os centróides dos dois pontos. Consoante essa distância, são enviados comandos aos motores passo-a-passo. À área de *detecção* e *tracking* de mais do que um objeto é dado o nome de **Multi-Object Tracking** (Rastreamento de Múltiplos Objetos).

De uma forma sucinta, neste trabalho são exploradas duas áreas do processamento de imagem:

- Processamento de Imagem em Tempo Real
- Multi-Object Tracking

O processamento de imagem em tempo real desempenha um papel essencial na inspeção de sistemas industriais e continuará a fazê-lo enquanto o seu domínio estiver a ser expandido para produtos eletrónicos de consumo baseado em multimédia, tais como câmaras e telemóveis digitais e sistemas de vigilância [26].

De forma a garantir um sistema de tempo real, é necessário um processamento de uma quantidade significativa de imagem de uma forma sequencial e temporizada, com objetivo de extrair informação útil. Uma vez que estas imagens digitais são essencialmente sinais multidimensionais, requerem capacidade de computação e de memória extensa. A utilização do computador para este fim é vantajosa por duas razões:

- *Flexibilidade e Adaptabilidade*: O computador digital não é sujeito a modificações de hardware quando se pretende reprogramá-lo para diferentes tarefas.

-*Transmissão e Armazenamento de Dados*: Com o desenvolvimento de diferentes algoritmos de compressão de imagem, a informação digital pode ser armazenada convenientemente. Esta informação pode ainda ser devidamente partilhada com outros computadores.

No entanto, é importante referir que existem duas limitações presentes no processamento de imagem digital por um computador: (1) Velocidade de Processamento; (2) Memória.

4.2 Multi-Object Tracking (MOT) em MATLAB®

O objetivo do processamento de imagem em MOT é de adquirir um sinal de um sensor e produzir uma lista de alvos potenciais e os seus atributos. Este sinal pode ser uma imagem capturada por uma câmara e a lista de atributos pode ser o centróide ou a área, em cada alvo da imagem [25].

Apesar da câmara utilizada ser monocromática, o programa desenvolvido neste trabalho admite a utilização de câmaras que detetem cores RGB, transformando a imagem em preto e branco. Atualmente, algumas câmaras já dispõem de um software próprio para recolha e processamento de imagem, dispondo de ferramentas como melhoramento da qualidade e reconhecimento de formas ou objetos. Contudo, como neste trabalho é necessário fazer uma interligação entre a imagem recolhida e o controlo dos motores, o ideal será a utilização de um software mais genérico.

4.3 Módulos do Algoritmo

De forma a detetar o feixe de laser emitido e refletido, foram utilizadas algumas funções disponíveis na “*Image Processing ToolBox*” do *MATLAB*®. Os processos principais estão descritos neste subcapítulo, não estando descritos pela ordem que aparecem no programa.

4.3.1 Aquisição de Vídeo

A função utilizada para a aquisição de vídeo foi a **imaq.VideoDevice** e é genericamente escrita como : *obj=imaq.VideoDevice(adaptornome)* [27]. Esta função é utilizada para adquirir *frames* consecutivos, de forma a criar um vídeo.

Se se quiser acrescentar informação, relativamente à câmara, tal como resolução, *id* do dispositivo, captura de imagem em *RGB* ou monocromática (*grayscale*), são acrescentadas à função essas informações.

Neste trabalho, a captação de imagem é feita da seguinte forma:

```
vidDevice=imaq.VideoDevice( 'gige', 1, 'Mono8'... % Aquire input video stream
                             'ROI', [1 1 2048 1536],...
                             'ReturnedColorSpace', 'rgb');
```

na qual '**gige**' é o nome do adaptador de vídeo, '**1**' é o *deviceid*-um valor que identifica um dispositivo disponível a partir do adaptador de vídeo, '**Mono8**' é o formato, '**ROI**' é a Region Of Interest, onde se especifica, dentro da área total que a câmara abrange, qual é a área que abrange (a área de interesse) e '**ReturnedColorSpace**' é cor da imagem.

Aquando do inicio do trabalho, trabalhou-se com uma câmara RGB, sendo que se adquiria uma imagem RGB e depois se aplicava a transformação para GrayScale (preto-e-branco). Mais tarde, foi adquirida a câmara mencionada no subcapítulo 3.3.2, secção “4) Autocolimador Digital”, mas manteve-se o programa, para que houvesse a possibilidade de um dia, caso seja necessário vir a identificar cores.

Uma das funções que o *imaq.VideoDevice* suporta é o **step**. Quando utilizado, é iniciado o processo de *streaming* do vídeo. Ou seja, de forma a inicializar o output do vídeo, a função step pode ser usada da seguinte forma: *frame=step(obj)*.

4.3.2 Blob Analysis

O bloco de Blob Analysis pertence à secção de *visionstatistics* e é usado para calcular propriedades de regiões de uma imagem binária, tais como o centróide, número de blobs, orientação, excentricidade, diâmetro e perímetro [28]. Um “**Blob**” é referido como uma região contínua, ou um conjunto de componentes conectado.

Este bloco é responsável pela deteção do feixe de laser emitido e refletido. Nele são inseridas algumas propriedades necessárias para que seja possível detetar apenas esses dois feixes, e não reflexos de luz exterior. A figura 52 representa o bloco, e algumas das suas propriedades.

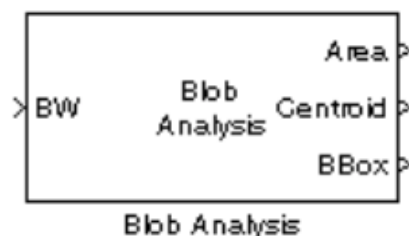


Figura 52- Bloco Blob Analysis da secção de visionstatistics do MATLAB® com algumas propriedades que permite avaliar

Considerando a figura 52, é possível identificar algumas propriedades:

- **BW**: Vetor ou matriz que representa a imagem.
- **Area**: Vetor que representa o número de pixéis numa região legendada.
- **Centroid**: Matriz M-2 com as coordenadas dos centróides, onde M representa o número de objetos detetados.
- **BBox**: Matriz Mx4 [*x y comprimento altura*] representativa da Bounding Box, que é um retângulo à volta do Blob, que indica a sua deteção pelo software.

Neste trabalho, são ainda utilizados outros critérios de detecção que o bloco *Blob Analysis* permite:

MinimumBlobArea: Permite definir a área mínima que um blob deve ter, para ser detetado.

MaximumCount: Permite definir o número máximo de Blobs a serem detetados. Como se pretende apenas detetar dois feixes de laser, esta propriedade foi adicionada com o valor de “2”.

4.3.3 Transformação de Cor para Escala de Cinza

O sinal de entrada é uma imagem colorida na qual cada pixel pode ser representado por 24-bit, o que significa que existem 8 bits para cada cor, o vermelho, verde e azul. Utilizando este método de codificação, em cada pixel podem ser representadas um total de 16.8 milhões de cores diferentes.

A maior parte dos sistemas de processamento de imagem trabalham apenas com imagens a preto e branco ou imagens binárias, uma vez que imagens coloridas ocupam maior memória e desaceleram o processo computacional. Como tal, o primeiro passo consiste em converter a imagem colorida numa imagem de escala cinzenta, uma vez que esta apenas contém informação geral e de uma forma mais generalizada da imagem original.

Existem, atualmente, mais do que uma só opção de conversão de uma imagem indexada, de cor, para uma imagem binária e monocromática. Neste trabalho utilizou-se a função **im2bw** ([29]), que utiliza o conceito de *threshold* para converter uma imagem numa imagem binária, utilizando como critério um **thresh**, que especifica o nível de luminosidade.

4.3.4 Redução de ruído da imagem

De forma a reduzir o ruído da imagem de entrada, utiliza-se o seguinte método: **B=medfilt2(A, [M N])**, na qual é aplicada uma filtragem média na matriz A, onde cada pixel de output contém o valor médio da sua vizinhança inserida na área $M \times N$. O “2” presente na função “medfilt2” indica que é uma filtragem média em 2D [30].

4.4 Determinação do erro máximo permitido

A finalidade do algoritmo de processamento de imagem desenvolvido neste trabalho é de detetar os centróides do feixe de laser emitido e do feixe refletido e, a partir disto, calcular a distância entre eles.

O **eixo x** e o **eixo y** do plano da imagem são medidos em *pixel*, pelo que é necessário converter a distância detetada em micrómetros. Para tal, foi necessário consultar o catálogo da câmara e averiguar a relação entre pixel e micrómetros [31]:

$$Pixel\ size = 3.45\mu m \quad (22)$$

Além da relação estabelecida na equação 20, é necessário calcular a ampliação angular da objetiva, sendo esta a “razão entre a dimensão da imagem na retina quando o objeto é visualizado através do instrumento e a dimensão da mesma imagem quando vista pelo olho desarmado à distância normal de observação.” Neste caso, a imagem na retina é a imagem gerada pelo algoritmo de processamento de imagem. Ou seja, a distância entre os dois feixes de laser, gerada pelo algoritmo de processamento de imagem, não será a distância real entre os dois objetos. É necessário, então, a ampliação angular existente:

$$M = \frac{d - f}{f} \quad (23)$$

em que d é a distância entre a objetiva e o plano da lamela, e f é a distância focal da objetiva. Substituindo d por 19,2mm e f por 6mm, obtém-se a seguinte relação:

$$M \cong 2.2 \quad (24)$$

Para confirmar o resultado obtido da equação 24, foram feitas várias medições com um paquímetro, enquanto se confirmava a medida dada pelo algoritmo de processamento de imagem. Verificou-se que, para obter um erro submicrométrico, ou seja, no máximo de $0.9\mu\text{m}$, a distância lida pela câmara tem que ser $0.41\mu\text{m}$. Utilizando a equação 20, chega-se à conclusão que a **distância máxima** terá de ser aproximadamente 0.12 pixel.

Após alguns testes, verificou-se que era possível realizar um nivelamento em que a distância máxima, em pixel, seria de $dy \leq 0.067\text{ pixel}$, que equivale a:

$$\varepsilon \leq 0.5\mu\text{m}. \quad (21)$$

5. Comunicação Série com os Controladores

De forma a comunicar com os motores passo-a-passo, foi utilizada uma comunicação série, utilizando a interface RS-485. Para tal, utilizou-se o cabo *ZK-RS485-USB*, para estabelecer a ligação entre o PC e as drives.

Para comunicar com as drives pela porta série, são utilizados uma série de comandos que estão definidos e descritos no manual fornecido pela Nanotec: “**Programming Manual for Stepper Motor Controllers**” [32].

5.1 Comandos

De forma a comunicar com as drives, todos os comandos seguem uma lógica estabelecida. Primeiramente, antes de estabelecer a comunicação, é necessário atribuir um endereço (*module address*) a cada uma das drives, pelo procedimento explicado no subcapítulo 3.3.1, na categoria de “*Drives e Fonte de Alimentação*”. Isto é necessário para que seja possível a comunicação individual com cada drive.

Neste capítulo são explicados os comandos mais importantes para comandar um motor passo-a-passo através do controlador (drive) respetiva.

Os comandos começam com o símbolo ‘#’ e acabam com o comando ASCII ‘\r’. Após o carácter inicial, é escrito o *module address* em notação decimal, que admite valores de ‘1’ a ‘254’. Segue-se o comando correspondente ao movimento/ alteração de propriedade desejado. Por exemplo, o comando ‘#1s1000\r’ diz ao motor 1 para executar 1000 passos [32].

Se for enviado um comando inválido à drive, este é enviado de volta como eco, mas sem o símbolo ‘#’.

Existem ainda comandos designados de “comandos longos”, na qual a estrutura varia ligeiramente, tais como o comando ‘CL’ (closed loop), que permite o controlo em malha fechada. Um exemplo da sua utilização é para identificar o tipo de motor a ser comandado pela drive. Pode ser um motor passo-a-passo, que assume o valor de 0, um BLDC com sensores Hall (valor 1) e um BLDC com sensores Hall e encoder (valor 2). Para um motor passo-a-passo, é escrito da seguinte forma: ‘#2: CL_motor_type0\r’.

Para ler o valor que se encontra associado a uma propriedade, tal como a corrente de fase, o *module address* e o número de passos, utiliza-se o comando ‘Z+ **parâmetro**’. Por exemplo: ‘#1Zs\r’ permite obter uma resposta com o número de passos, sendo a resposta dada da seguinte forma: ‘1Zs1000\r’.

Quando é estabelecida a comunicação com uma drive, existem uma série de comandos de inicialização, que são indispensáveis no algoritmo. Os comandos mais utilizados para comunicar com as drives estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Comandos principais para estabelecer uma comunicação série com a drive SMCI47-S2

Comando	Função	Exemplo
<i>CL</i>	Modo “Closed Loop”	#1: CL_motor_type0\r
<i>i</i>	Phase Current	#1i62\r
<i>g</i>	Step Mode	#1g1\r
<i>ramp_mode</i>	Estilo de Rampa	#1:ramp_mode0\r
<i>accel</i>	Aceleração da rampa	#1:accel5\r
<i>decel</i>	Desaceleração da rampa	#1:decel5\r
<i>baud</i>	Baudrate do controlador	#1:baud12\r
<i>p</i>	Profile mode	#1p1\r
<i>d</i>	Direção de rotação	#1d0\r
<i>s</i>	Número de passos	#1s100\r
<i>u</i>	Velocidade mínima	#1u300r
<i>o</i>	Velocidade máxima	#1o400\r
<i>A</i>	START	#1A\r
<i>S</i>	STOP	#1S\r

Relativamente à tabela 1, existem algumas considerações a ser feitas:

- A corrente é dada em percentagem, relativamente à corrente máxima admissível;
- A baudrate usada para a comunicação com a drive é de 115200 bps, que é atribuída com o valor “12”;
- As velocidades máxima e mínima são escritas em Hz(passos/segundo), pelo que os valores se referem a frequências;
- O estilo da rampa pode ser: trapezoidal (valor “0”), sinusoidal (valor “1”), *jerk-free* (valor “2”). A rampa adotada para todos os movimentos dos motores foi a trapezoidal;
- A aceleração e desaceleração da rampa são escritas em Hz/s.

5.2 Integração com o MATLAB®

Uma vez que o processamento de imagem foi realizado no *MATLAB*® decidiu-se centralizar as operações, e estabelecer a comunicação com os controladores a partir do mesmo software. Para tal, foi necessário conhecer o método de comunicação série do *MATLAB*®. Na figura 53 são descritos os passos para estabelecer uma comunicação série com um dispositivo.

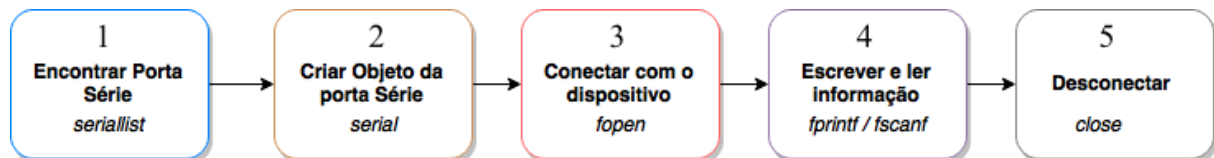


Figura 53- Esquema das tarefas a efetuar para estabelecer uma comunicação série no MATLAB®. Em cada tarefa está escrito o comando para a efetuar

Depois de encontrada a porta série correspondente à ligação com as drives, é criado e aberto um objeto da porta série. Uma vez que a porta série se mantém, após a utilização do comando “*seriallist*” e depois de averiguar qual a porta correspondente ao dispositivo, este comando não foi mais inserido no algoritmo.

Um **aspecto fulcral** na comunicação com as drives SMCI47-S2 é o comando ASCII “CR- Carriage Return”, representado pelo carácter “\r”. Quando se estabelece a comunicação com a porta série, na etapa 2, já é indicado que a troca de dados vai ser feita com o carácter de controlo CR. Como tal, na etapa 4, o comando a ser enviado para as drives SMCI47-S2 não termina o com “\r”, mas sim da seguinte forma: #1s100’.

```

s= serial( 'COM3', 'BaudRate', 115200, 'Timeout', 2, 'Terminator', 'CR');
fopen(s);
fprintf(s, '#1i62');
    
```

O exemplo acima referido ilustra o passo 2,3 e 4 da figura 53. Depois de criado o objeto, no qual já estabelece que as mensagens são enviadas com o “CR”, abre-se o objeto e envia-se a informação para o controlador.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

6. Funcionamento do Programa Desenvolvido em MATLAB®

Neste capítulo, é explicado o funcionamento do programa desenvolvido em MATLAB®, as suas etapas e transições, que estão representadas pelo grafcet presente na figura 55. Este programa encontra-se no anexo A4.

O algoritmo explicado no capítulo 4, de processamento de imagem, e no capítulo 5, de controlo dos motores, são executados de forma **simultânea e dependente** um do outro, programados para que se obtenha um nivelamento do C.M.E. submicrométrico.

No subcapítulo 6.1 é explicada a interligação entre o processamento de imagem e o controlo dos motores.

No subcapítulo 6.2 é explicado, através de um grafcet, o funcionamento de todas as etapas do programa, e as suas transições.

6.1 Interligação entre o Processamento de Imagem e o Controlo dos Motores

Após a primeira captura de imagem, o algoritmo de processamento de imagem e de controlo dos motores passo-a-passo ocorre de uma forma simultânea. Consoante a distância entre os dois feixes de laser (dy) que é detetada pelo bloco “Blob Analysis”, são chamadas diferentes funções de controlo com os motores. Nestas funções os parâmetros mais importantes variam, tais como

- Step mode (Full Step, Half Step, Microstepping);
- Número de Passos;
- Velocidade.

Se os dois feixes de laser se encontrarem a uma distância muito próxima, será “chamada” para o “script” a função de controlo do motor na qual é utilizado microstepping, por exemplo. Na figura 54 é feita uma ilustração da interligação entre o processamento de imagem e as funções de controlo de motores. Por exemplo, se a distância entre os dois pontos foi maior do que 10 pixéis, será chamada uma função na qual é feito um movimento com maior velocidade e número de passos. Por outro lado, se a distância for menor, será chamada outra função, na qual o movimento será mais suave e mais curto (função 3, da figura 54).

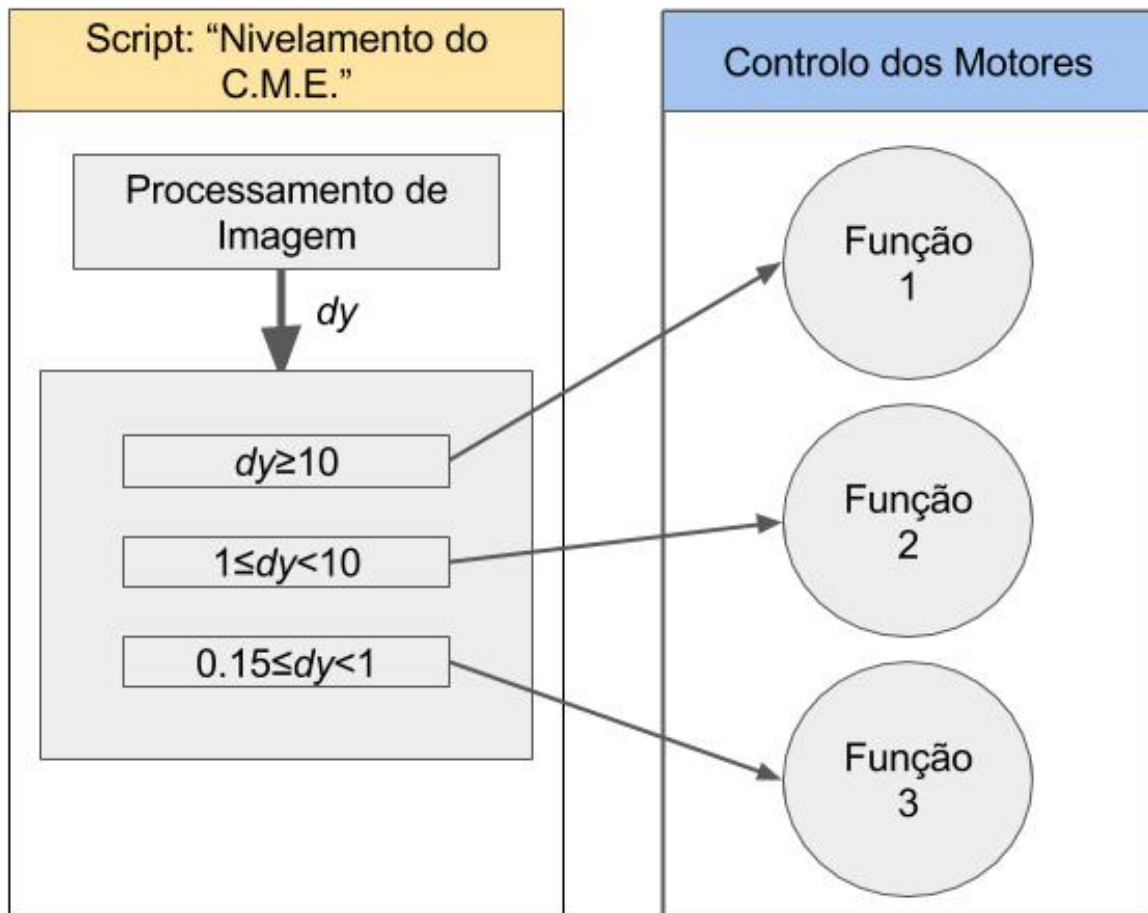


Figura 54- Interligação entre o Processamento de Imagem e o Controlo de Motores. A variável “dy” representa a distância entre os dois feixes de laser

6.2 GRAFCET

Como se encontra mencionado no *subcapítulo 3.3.1*, na secção “5) Encoder de Ligação de Sistemas”, é utilizado um **encoder** que já se encontrava presente no Círculo Meridiano que, estando em contacto com uma das rodas do eixo, permite a obtenção da posição do eixo em toda a sua rotação. Esta informação é útil pelo seguinte motivo: se o Círculo Meridiano ainda se encontrar em rotação, não é permitido ao programa de nivelamento entrar em repouso. Apenas quando é detetado que o eixo se encontra fixo numa posição angular, é que o sistema de nivelamento realiza, se necessário, ajustes finais, e só depois entra em modo *stand-by*. Neste, aguarda que o encoder sinalize a nova rotação do eixo, ou que seja efetuado um pedido de nivelamento.

Antes de ser analisado o grafcet presente na figura 55, são feitas algumas considerações:

- 1) O encoder de ligação é representado pela letra “T”. Quando **I=1** o eixo do C.M.E. encontra-se em rotação. Caso contrário, o sinal enviado pelo Arduino é **I=0**;

- 2) Como explicado no subcapítulo “4.4- Determinação do erro máximo permitido”, o erro máximo é medido no eixo y, sendo que o erro permitido, medido no eixo y, é de $dy \leq 0.067 \text{ pixel}$, correspondente a $0.5\mu\text{m}$ na lamela;
- 3) São utilizados dois fins-de-curso de toque para o processo de inicialização do C.M.E. Estes são representados por “MS” (*micro-switch*). Quando $MS=1$ significa que existe contacto, e que o eixo do C.M.E. se encontra na sua cota mais baixa permitida. Após 20 segundos o eixo do C.M.E. encontra-se na posição de engrenamento pretendido.
- 4) O comando “**Run**” é utilizado para dar início ao programa de Nivelamento do C.M.E.
- 5) Como explicado no subcapítulo “3.3.1- Disposição do Sistema”, o motor mais próximo da roda de engrenamento, **Motor 2**, após garantir esse engrenamento, fica fixo nessa posição. O **Motor 1** é depois usado para o nivelamento.

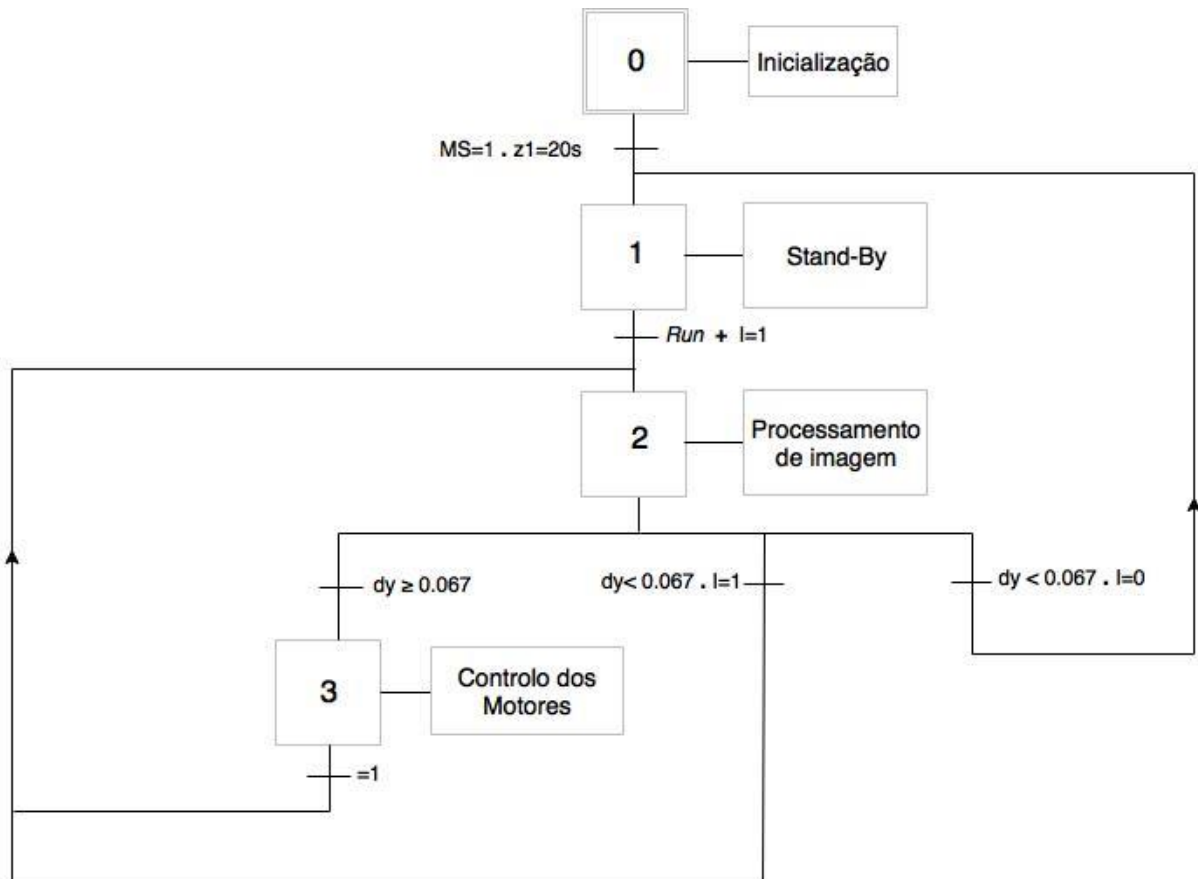


Figura 55- Grafcet representativo do programa desenvolvido no MATLAB® para o nivelamento do Círculo Meridiano de Espelho

As etapas do programa são definidas da seguinte forma:

- **Etapa 0** : Nesta etapa inicial, os motores efetuam uma rotina de inicialização, na qual rodam para o sentido da descida do C.M.E. até que atingem o seu fim-de-curso, sinalizado por um microswitch. Após 20 segundos (o tempo necessário para que os motores cheguem à posição correta), o eixo do C.M.E. está na posição que garante o engrenamento correto da roda. Aí, o sistema transita para a *etapa 1*.
- **Etapa 1**: Nesta etapa, o sistema encontra-se em *stand-by*, aguardando que se dê o comando de início do nivelamento do C.M.E., ou que o encoder de ligação sinalize que o eixo está em rotação.
- **Etapa 2**: Nesta etapa, é dado o início do processamento da imagem. A transição desta etapa pode ser devida a três situações: **(1)** se for detetada uma distância superior à admissível(0.067 pixel), o sistema transita para a etapa 3; **(2)** se for detetada uma distância inferior a 0.067 pixel mas o eixo do C.M.E. ainda se encontra em rotação($I=1$) o sistema transita para a etapa 2; **(3)** se for detetada uma distância inferior a 0.067 pixel e o encoder indicar que o eixo do C.M.E. se encontra em repouso($I=0$), o sistema transita para a etapa 1.
- **Etapa 3**: Nesta etapa, é iniciado o controlo do Motor 1. Consoante a distância entre os feixes de laser, o motor é atuado. Desta etapa, transita-se de novo para a etapa 2, onde é verificada novamente a distância. Esta transição é, idealmente, feita de uma forma muito expedita, dependendo da velocidade de processamento do PC.

É importante salientar que este sistema apenas é capaz de atuar no eixo vertical à direção Este-Oeste. Ou seja, durante a rotação, existem momentos em que apesar de os dois feixes se encontrarem alinhados submicrometricamente no eixo vertical, encontram-se a uma distância lateral um do outro. Isto deve-se à restrição da atuação dos motores passo-a-passo na direção vertical, sendo que nunca foi desenvolvido, no Círculo Meridiano, um sistema capaz de garantir ajustamentos no eixo horizontal.

7. Testes e Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados de alguns testes realizados para averiguar o funcionamento do programa de nivelamento desenvolvido neste trabalho. No subcapítulo 7.1 é feita uma análise do tempo que o sistema demora a corrigir a posição vertical do feixe refletido, para uma determinada posição.

No subcapítulo 7.2 é descrito o comportamento do feixe refletido, durante a rotação do Círculo Meridiano, em diferentes situações.

No subcapítulo 7.3 é evidenciada a variação da distância horizontal entre os dois feixes.

No subcapítulo 7.4 são feitas conclusões relativamente aos resultados obtidos nos subcapítulos anteriores.

7.1 Análise do programa de nivelamento

De forma a analisar a velocidade com que o sistema de nivelamento opera, foi realizado um teste no qual o algoritmo de processamento de imagem deteta os dois feixes e automaticamente comunica com os motores passo-a-passo-a-passo para corrigir a discrepância existente. Na figura 56 é representada essa correção:

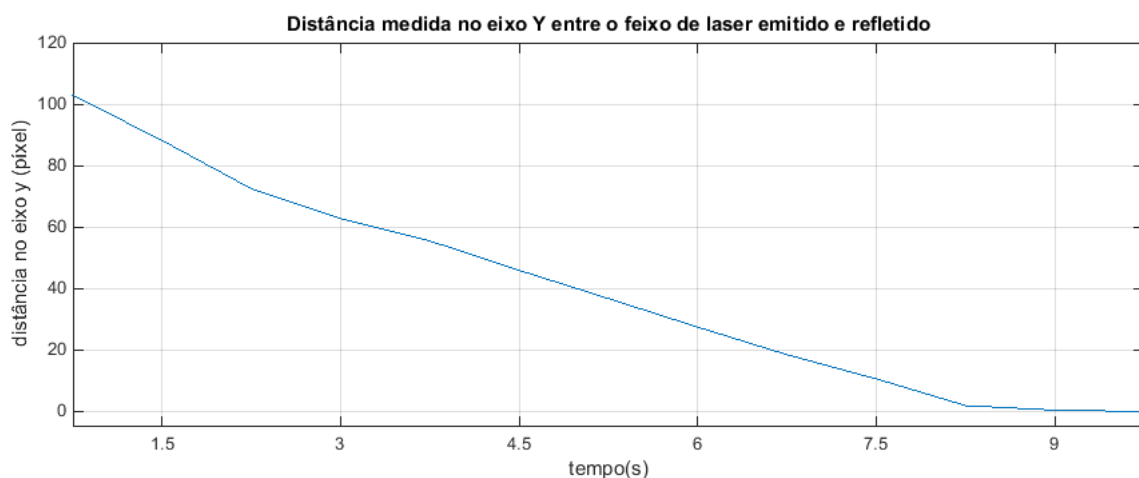


Figura 56- Distância entre os dois feixes, quando detetados pelo sistema de nivelamento

Como ilustrado na figura 56, o sistema de nivelamento demora 9 segundos a aproximar os dois feixes separados a uma distância de aproximadamente 100 pixel (345 micrómetros). Após 7.5 segundos é utilizado microstepping para realizar os ajustes finais.

7.2 Comportamento do feixe refletido durante a rotação do Círculo Meridiano

O procedimento de um teste é constituído por duas partes: **(1)** Comando de rotação do eixo para o ângulo pretendido; **(2)** Análise do gráfico gerado pelo MATLAB®, no qual a distância dos dois feixes é representada, em relação ao tempo.

Em todos os testes, o sistema inicia-se nivelado, com uma distância máxima de 0.5 micrómetros.

1. Rotação do eixo do C.M.E. sem intervenção do sistema de nivelamento

Na figura 57 encontra-se representado um gráfico no qual a distância vertical entre os dois feixes de laser é medida ao longo de uma rotação de 360° do eixo do Círculo Meridiano. Esta rotação demora 180 segundos a ser perfazida. O eixo de rotação abstrato do espelho central induz um comportamento elíptico ao feixe de laser refletido.

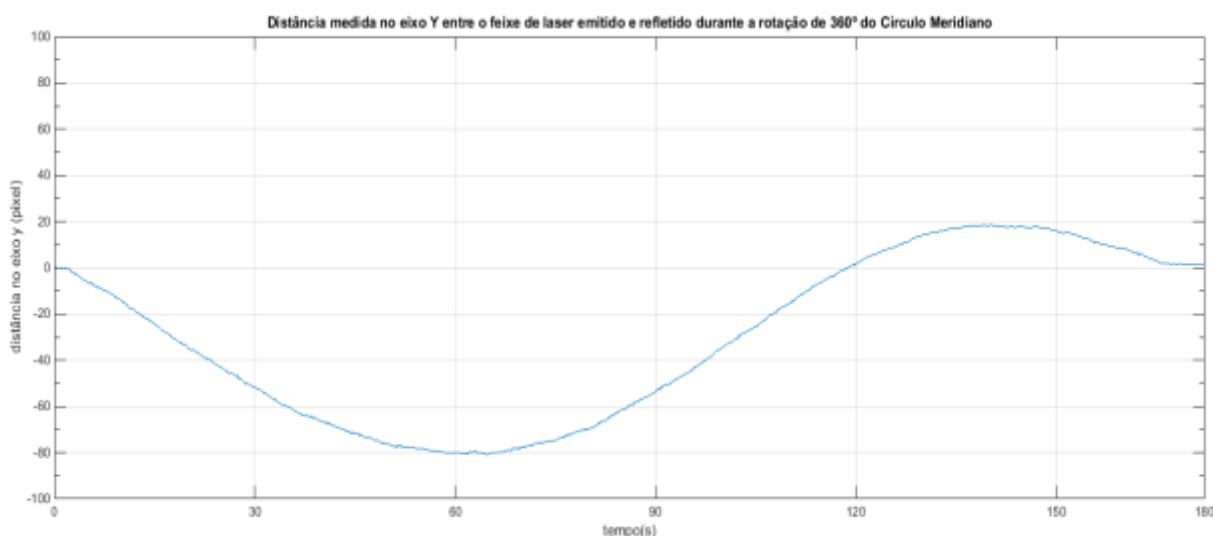


Figura 57- Distância entre o feixe emitido e refletido, durante uma rotação completa do eixo do C.M.E., sem intervenção do sistema de nivelamento

Como é possível observar na figura 57, existe um desfasamento considerável entre os dois feixes de laser, ao longo da rotação. Passados 60 segundos, é atingida a maior distância, sendo esta de 276 micrómetros, ou 0.276 milímetros. Após uma rotação completa, o ponto tende a voltar para a posição original. No entanto, se fosse pretendido comandar o instrumento para uma posição celeste diferente da inicial, o eixo ficaria desalinhado.

2. Rotação do eixo do C.M.E. com intervenção do sistema de nivelamento

Na figura 58 é possível observar um gráfico representativo da distância entre os dois feixes de laser, durante uma rotação do Círculo Meridiano, com a intervenção do sistema de nivelamento.

O sistema desenvolvido e o espelho central contrariam-se, sendo que cada vez que os motores passo-a-passo realizam um movimento para nivelar o eixo, o espelho central induz um deslocamento no feixe refletido. Ou seja, observou-se que, devido à mudança de posição súbita do ponto refletido, não é possível manter o eixo constantemente alinhado, aquando a rotação. É, no entanto, possível, manter o feixe refletido o mais perto possível da posição ideal, sendo que nesta experiência foi possível obter um deslocamento máximo de 10 pixel, aos 28 segundos (Figura 58).

Quando o sistema entra em repouso aos 110 segundos, o sistema de nivelamento faz os ajustes finais, até que a distância entre os dois pontos seja, no máximo de 0.067 pixel, ou seja, um erro máximo de $0.5 \mu m$.

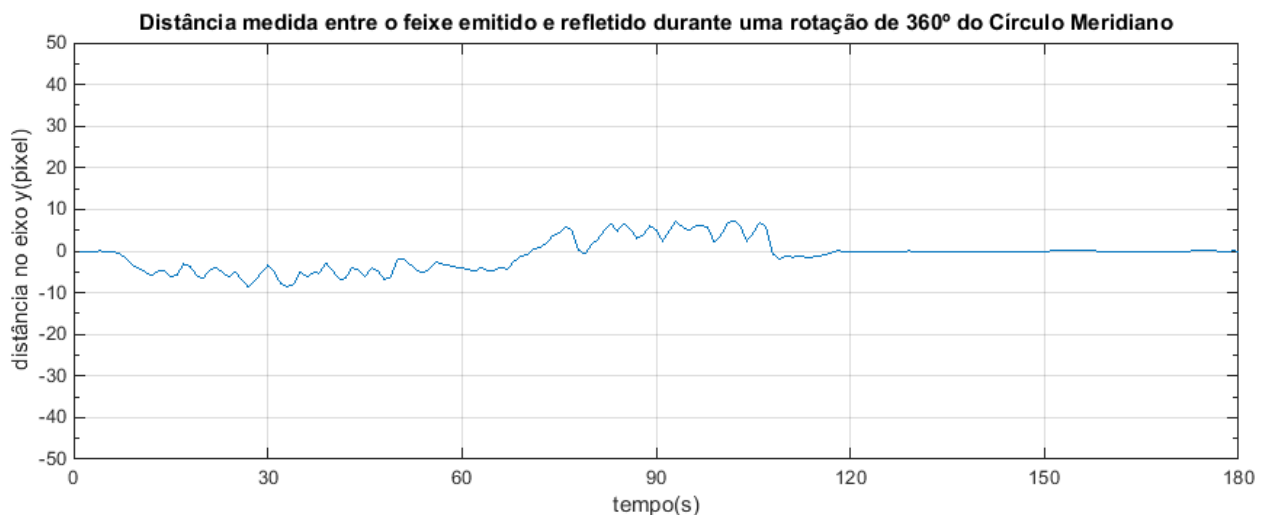


Figura 58- Distância entre o feixe de laser emitido e refletido, durante uma rotação do eixo do C.M.E., com intervenção do sistema de nivelamento

Uma vez que se observou que não era possível manter o eixo alinhado durante a rotação, considerou-se apenas utilizar o sistema de nivelamento quando o eixo estivesse em repouso.

Contudo, observou-se que, como o comportamento do eixo central é imprevisível, ocorriam situações nas quais o ponto refletido se afastava demasiado do feixe emitido, deixando de ser detetável no autocolimador. Consequentemente, decidiu-se manter o sistema de nivelamento operacional durante a rotação do eixo do Círculo Meridiano, de forma a prevenir este tipo de situações. Adicionalmente, o ajuste final é realizado mais rapidamente, uma vez que o ponto se encontra mais perto da origem.

Como referido anteriormente, foi estabelecido um erro máximo de nivelamento de 0.067 pixel. Verificou-se que é possível nivelar o eixo do C.M.E. abaixo desse limite. A figura 59 comprova os resultados obtidos, na qual é possível observar que, aos dois segundos, os dois feixes de laser se encontravam a uma distância de 0.035 pixel, que corresponde a $0.261 \mu m$.

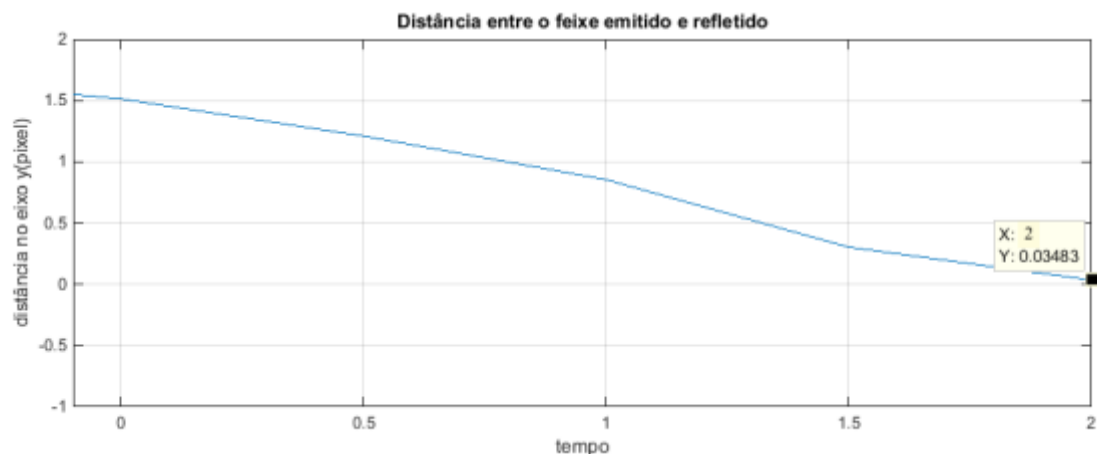


Figura 59- Nivelamento submicrométrico. Aos 2 segundos, a distância entre os dois feixes é de aproximadamente 0,035 pixel, que corresponde a $0,261 \mu m$

7.3 Distância entre os dois feixes de laser no eixo horizontal

De forma a averiguar a distância entre os dois feixes de laser, no eixo horizontal, realizaram-se alguns testes nos quais o Círculo Meridiano perfazia uma rotação de 360° . Naturalmente, estes testes foram efetuados sem a intervenção do sistema de nivelamento, uma vez que este apenas atua no eixo vertical. A figura 60 representa um dos testes efetuados:

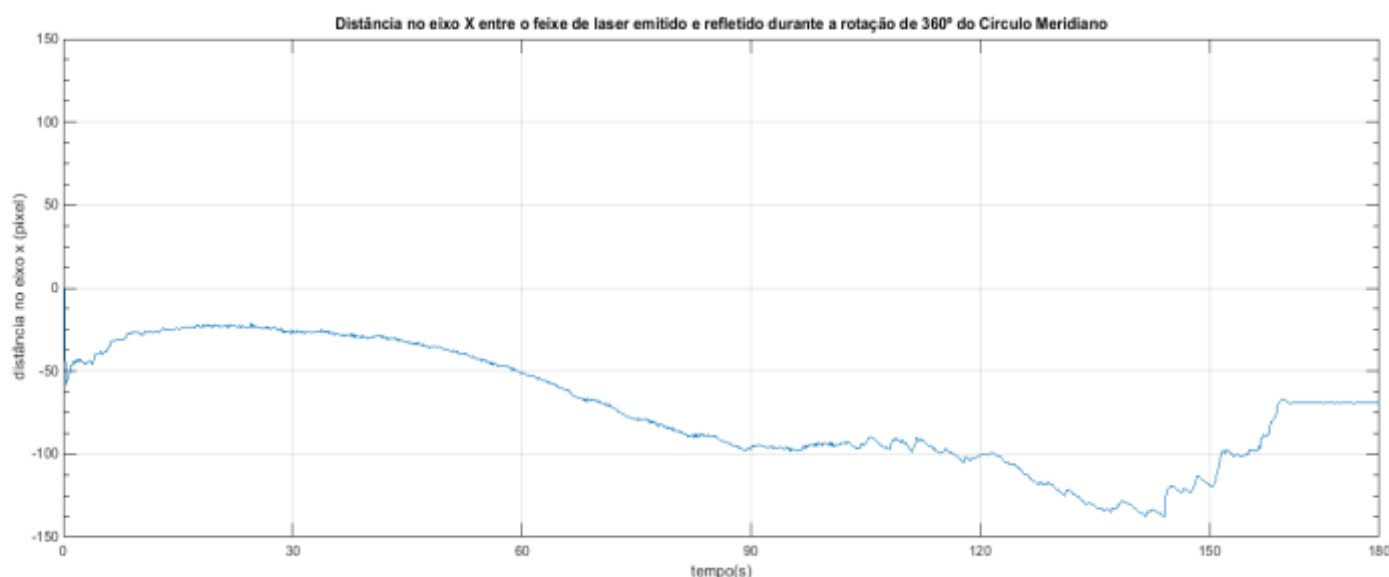


Figura 60- Distância entre os dois feixes de laser, no eixo horizontal, durante uma rotação de 360° do Círculo Meridiano

Como é possível observar na figura 60, os dois pontos encontram-se consideravelmente afastados, em relação ao eixo horizontal. Uma vez que o sistema de nivelamento desenvolvido

neste trabalho apenas permite ajustar o a posição do espelho no eixo vertical, é necessário contabilizar esta discrepância horizontal no cálculo da hora. Este assunto é novamente mencionado no subcapítulo 8.2 “*Trabalhos Futuros*”.

7.4 Conclusões dos Resultados Obtidos

Fazendo uma análise do subcapítulo 7.2 e do 7.3 é possível retirar as seguintes conclusões:

- Nas experiências realizadas, o erro máximo obtido durante a rotação foi reduzido de 276 micrómetros para 34.5 micrómetros, ou seja, existe uma redução de 8 vezes entre as duas situações;
- O sistema desenvolvido neste trabalho permite atingir o objetivo proposto: atingir um alinhamento submicrométrico de forma automática, relativamente ao feixe de laser emitido. O gráfico representado na figura 59 mostra o alinhamento efetuado no qual a distância final entre os dois feixes de laser foi $0.261 \mu m$.
- Os dois feixes de laser, durante a rotação do Círculo Meridiano, mantêm-se desfasados no eixo horizontal.

8. Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1 Conclusões

O trabalho descrito nesta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema eletromecânico capaz de nivelar submicrometricamente, e de uma forma automática, um instrumento científico presente no Observatório Astronómico do Porto: o Círculo Meridiano de Espelho, capaz de calcular a hora com base na posição de corpos celestes. Este sistema teve por base o controlo de dois motores passo-a-passo, com base na inclinação angular detetada por uma câmara CCD presente num autocolimador digital.

De um ponto de vista prático, o trabalho realizado pode ser dividido em cinco etapas:

- A primeira etapa foi associada à definição do problema. Foram definidos os componentes a fazer parte do sistema eletromecânico, e as áreas de estudo a serem exploradas: o processamento de imagem e a comunicação série com motores passo-a-passo.
- A segunda etapa foi dedicada ao desenvolvimento de um algoritmo de processamento de imagem. Utilizando a ferramenta MATLAB®, que inclui as funções disponíveis na “*Image Processing Toolbox*”, foi possível detetar dois pontos, assim como calcular a área de cada um, e a distância entre eles, em tempo-real.
- A terceira fase foi dedicada à interligação entre o processamento de imagem e o controlo dos motores passo-a-passo. Foi estabelecida a comunicação série com os motores, utilizando os comandos próprios das drives. Uma vez que se pretendeu centralizar os dois processos, a comunicação com os motores foi também estabelecida em MATLAB®.
- Seguiu-se uma quarta fase, na qual foram realizados testes e melhorias ao programa, até se obter um erro máximo de 0.5 micrómetros no alinhamento relativamente ao feixe de laser emitido. Para tal, foi usado microstepping para realizar ajustes finos.
- Numa quinta fase, decidiu-se associar o sistema de rotação já existente do Círculo Meridiano ao programa desenvolvido neste trabalho. Para tal, foi utilizado um encoder em contacto com umas das rodas do eixo, que ao dar a informação da posição do eixo do C.M.E., é possível averiguar se este se encontra em repouso ou em rotação. Após a interligação entre os dois sistemas, realizaram-se novos testes, foram gerados gráficos e tecidas conclusões.

Após a observação dos resultados foi possível afirmar que o objetivo proposto para este trabalho foi cumprido. Através do sistema que foi desenvolvido, o eixo do Círculo Meridiano é nivelado de uma forma automática, obtendo-se um erro máximo submicrométrico. Contudo, é importante salientar que o alinhamento que é efetuado, com base no feixe de laser, é dependente do nivelamento prévio do autocolimador. Ou seja, o rigor submicrométrico que é alcançado pelo sistema eletromecânico desenvolvido depende da exatidão com que o autocolimador é nivelado, que de momento é efetuado com a incerteza referida.

A nível pessoal, o trabalho que é descrito nesta dissertação foi extremamente interessante, além de desafiante e enriquecedor. Ao longo da sua realização, foi-me permitido desenvolver conhecimentos de automação industrial, programação, controlo e eletricidade. Tive também a oportunidade de desenvolver competências em áreas que me eram completamente desconhecidas, sendo estas o processamento de imagem e a área da ótica.

Foi extremamente gratificante realizar um sistema para ser implementado num instrumento científico construído há cerca de 60 anos. Desenvolvi capacidades importantes para a minha carreira profissional, tais como pensamento crítico, capacidade de resolução de problemas e gestão de tempo.

O facto de o trabalho ter sido realizado no Observatório Astronómico permitiu-me trabalhar com profissionais dispostos a partilhar o seu conhecimento e a ajudar-me em qualquer questão pontual.

Finalmente, após a realização deste trabalho, anseio por novas oportunidades e desafios, que me permitam desenvolver os conhecimentos adquiridos ao longo da minha carreira académica.

8.2 Trabalhos Futuros

Existem alguns aspetos que seriam interessantes de ser estudados, para o melhoramento da exatidão e rigor do Círculo Meridiano. Neste subcapítulo são apresentadas essas considerações, e explicada a sua pertinência:

- A pertinência do nivelamento desenvolvido neste trabalho depende da exatidão com que o autocolimador se encontra paralelo ao eixo Este-Oeste. Este foi alinhado com o eixo do Círculo Meridiano que, aquando da sua construção, foi orientado para a direção Este-Oeste a partir das suas bases, que contêm um tambor que permite a retificação da posição angular do instrumento, com um deslocamento máximo de $\pm 1^{\circ}56'$. Seria interessante verificar se não houve um deslocamento angular do Círculo Meridiano, relativamente à sua construção. Se necessário, utilizar-se-ia o tambor para retificar a posição;
- Após a verificação de que o autocolimador se encontra, de facto, rigorosamente paralelo ao eixo Este-Oeste, poder-se-ia utilizar outro método de garantir a sua horizontalidade, que não o nível. Seria interessante garantir uma horizontalidade do autocolimador na ordem submicrométrica.
- Como mencionado no subcapítulo 6.2 e demonstrado no subcapítulo 7.3, ainda não foi desenvolvida uma técnica capaz de atuar horizontalmente no eixo de rotação do Círculo Meridiano. Consequentemente, existem alguns momentos, durante a rotação do eixo, que os dois feixes de laser se encontram desfasados no eixo horizontal, sendo impossível atuar sobre o feixe refletido. Uma possível solução que se idealizou, seria a instalação de pequenos motores piezoelétricos em alguns dos parafusos responsáveis pelo posicionamento do espelho central. Na verdade, crê-se que este ajuste era feito manualmente, apesar de não haver registos. Uma outra solução seria tentar fixar o espelho de uma outra forma, de modo a evitar o seu deslocamento axial.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

9. Referências

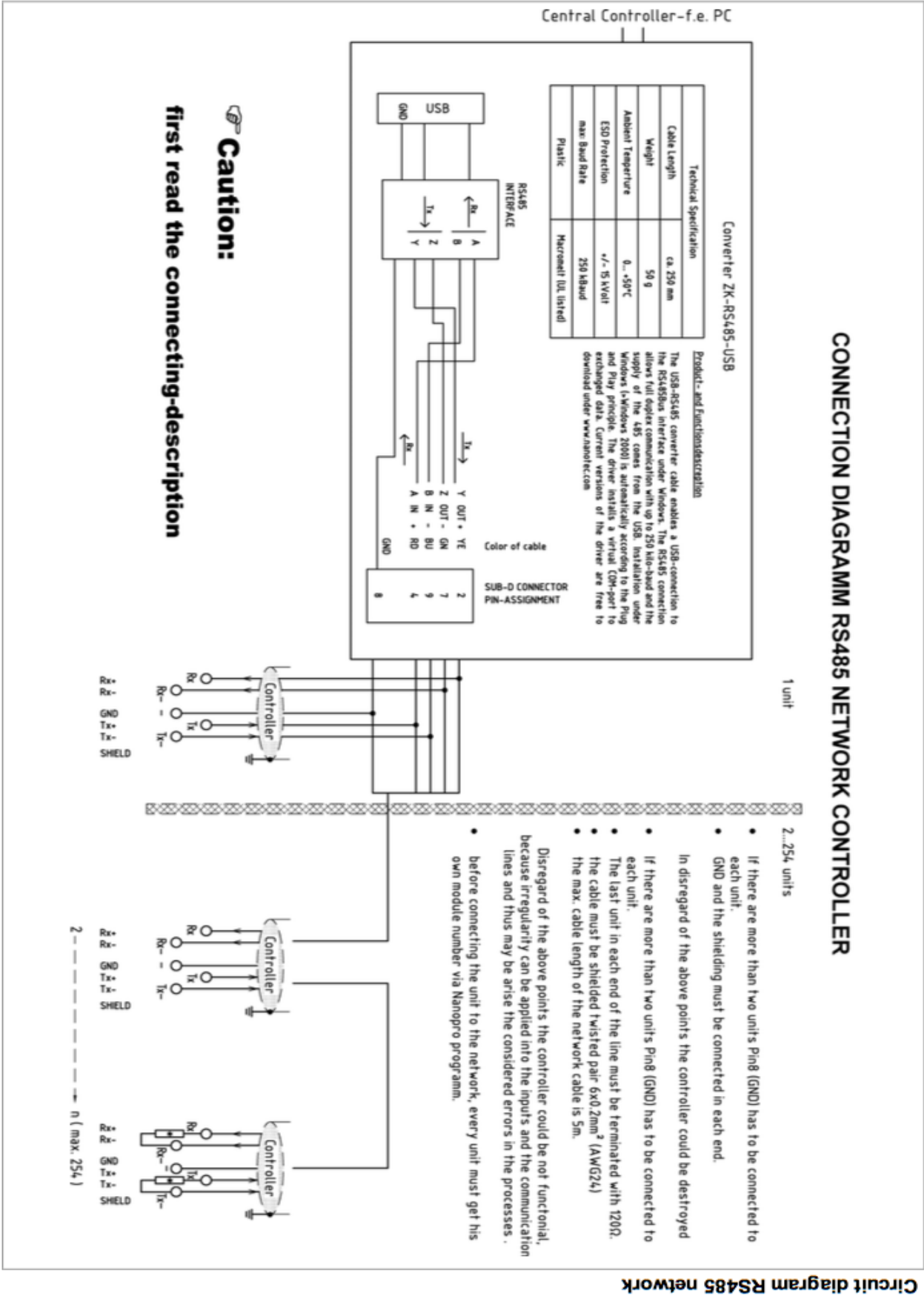
- [1] M. G. Pereira de Barros, “O Círculo Meridiano da Faculdade de Ciências do Porto,” in *Publicações do Observatório Astronómico da Universidade do Porto*, Porto: Imprensa Portuguesa, 1957, p. 89.
- [2] R. M. Edmund, “75 Years of Optics,” 2016. [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.eu/testing-detection/measurement-tools/High-Precision-Autocollimator/>. [Accessed: 28-Mar-2017].
- [3] W. Millar, “The Amateur Astronomer’s Introduction to the Celestial Sphere - William Millar - Google Livros,” 1st ed., Cambridge University Press, 2006, pp. 18–19.
- [4] M. G. Pereira de Barros, “The Mirror Transit Circle of Porto,” in *Anais da Faculdade de Ciências do Porto*, Porto, 1964, p. 11.
- [5] F. R. Chromey, *To Measure the Sky*, 2nd ed. Vassar College, New York: Cambridge University Press.
- [6] A. J. Campbell, “Optical alignment of- turbomachinery,” “*Proceedings of the Second Turbomachinery Symposium*,” no. 2. Texas A&M University, pp. 8–12, 1959.
- [7] K. Li, C. Kuang, and X. Liu, “Small angular displacement measurement based on an autocollimator and a common-path compensation principle,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 1, p. 015108, 2013.
- [8] S. Prakash, S. Singh, and S. Rana, “Automated small tilt-angle measurement using Lau interferometry,” *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 28, pp. 5905–5909, 2005.
- [9] D. Post and B. Han, “Moire Interferometry,” *Exp. Solid Mech.*, pp. 627–653, 2008.
- [10] J. Jahns and A. W. Lohmann, “The Lau effect (a diffraction experiment with incoherent illumination),” *Opt. Commun.*, vol. 28, no. 3, pp. 263–267, 1978.
- [11] B. Dorband, H. Muller, and H. Gross, *Handbook of Optical Systems*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH, 2012.
- [12] “Optical Angle Measurement - TRIOPTICS.” [Online]. Available: <http://www.trioptics.com/knowledge-base/optical-angle-measurement/>. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [13] G. T. Smith, *Machine Tool Metrology*, 1st ed. Hampshire, England: Springer International Publishing, 2016.
- [14] A. E. Ennos and M. S. Virdee, “High accuracy profile measurement of quasi-conical mirror surfaces by laser autocollimation,” *Precis. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 5–8, 1982.
- [15] Budynas and Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design, Eighth Edition,” in *Analysis*, 8th ed., McGraw-Hill, 2006, pp. 401–403.
- [16] Nanotec, “Precision Planetary Gears.” [Online]. Available: https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Baureiheneuebersichten/Getriebe/Product_Overview_GPLE80.pdf.

[Accessed: 30-May-2017].

- [17] B. Earl, “All About Stepper Motors,” *Adafruit Industries*, 2015. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/all-about-stepper-motors.pdf>. [Accessed: 29-May-2017].
- [18] Nanotec Electronic, “Product Overview ST8918,” 2016. [Online]. Available: https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Baureiheneuebersichten/Schrittmotoren/Product_Overview_ST8918.pdf.
- [19] T. Owen, “Standard Handbook Of Industrial Automation edited by Douglas M. Considine and Glenn D. Considine Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series, New York, 01 1987.,” *Robotica*, vol. 6, no. 3, p. 257, Jul. 1988.
- [20] N. E. Gmbh, K. G. Gewerbestra, and G. Tel, “Technical Manual Stepper Controller SMC147-S2,” 2013. [Online]. Available: https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Motorcontrols/SMC147-S_Technical-Manual_V2.3.pdf.
- [21] Weidmüller, “PRO ECO 480W 24V 20A | Weidmüller Product Catalogue.” [Online]. Available: http://catalog.weidmueller.com/catalog/Start.do?localeId=en_DE&ObjectID=1469510000. [Accessed: 30-May-2017].
- [22] K. Eismann, S. Duggan, and T. Grey, *Real World Digital Photography, 3rd Edition*, 3rd ed. Peachpit Press, 2010.
- [23] Baumer, “Incremental Encoders,” 2016. [Online]. Available: http://pfinder.baumer.com/pfinder_motion/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Drehgeber/Baumer_G0355_G0356_DS_EN.pdf.
- [24] C. Gige and V. Area, “Genie Nano Series TM,” 2016. [Online]. Available: https://www.stemmer-imaging.co.uk/media/uploads/dalsa/12/122239-Teledyne_DALSA_Genie_Nano_Series_Manual.pdf.
- [25] A. M. A. C. ROCHA, C. . Rodrigues, J. Rodrigues, and M. Gonçalves, “Processamento de imagem digital com MatLab: uma aplicação em ambiente industrial,ENEGI,” in *Atlas do 2º Encontro Nacional de Engenharia e Gestão Industrial - ENEGI*, 2013, pp. 75–76.
- [26] R. Gonzalez and R. Woods, *Digital image processing*, 3rd ed. Prentice Hall, 2008.
- [27] MathWorks, “Acquire one frame at a time from video device.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/imaq/imaq.videodevice.html>. [Accessed: 30-May-2017].
- [28] MathWorks, “Blob Analysis-Compute statistics for labeled regions.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/blobanalysis.html>. [Accessed: 30-May-2017].
- [29] MathWorks, “Convert image to binary image, based on threshold.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/im2bw.html>. [Accessed: 30-May-2017].
- [30] “2-D median filtering - MATLAB medfilt2.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/medfilt2.html>. [Accessed: 30-May-2017].
- [31] T. Dalsa, “Genie Nano M2020 Mono - Product Detail - Teledyne DALSA.” [Online]. Available: <http://www.teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/area-scan/genie-nano/G3-GM11-M2020/>. [Accessed: 30-May-2017].
- [32] N. E. Gmbh, K. G. Gewerbestra, and G. Tel, “Programming manual for stepper motor positioning controls,” 2013. [Online]. Available: https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Programmierung/Programming_Manual_V2.7.pdf. [Accessed: 31-May-2017].
- [33] J. Avison, “The World of physics,” 2nd ed., N. Thomas, Ed. India: Nelson, 1989, p. 43.

- [34] J. Osório, “Professor M.G.Pereira de Barros and the Astronomical Observatory of Porto,” in *Anais da Faculdade de Ciências do Porto*, Porto, 1968, p. 20.
- [35] O. A. do P. M. de Barros, “Observatório Astronómico da Universidade do Porto : Novo eixo do círculo meridiano : Desenho de conjunto : 3001,” 1965. [Online]. Available: <https://repositorio-tematico.up.pt/handle/10405/31066>. [Accessed: 27-May-2017].
- [36] K. Creath, J. Schmit, and J. C. Wyant, “Optical Metrology of Diffuse Surfaces,” in *Optical Shop Testing: Third Edition*, 3rd ed., J. Wiley & Sons, Ed. 2007, pp. 756–807.
- [37] J. Wen, Y. Zhang, and M. Xiao, “The Talbot effect: recent advances in classical optics, nonlinear optics, and quantum optics,” *Adv. Opt. Photonics*, vol. 5, no. 1, pp. 83–130, 2013.

ANEXO A1- Ligação ZK-RS485-USB



ANEXO A2- “Data sheet” do Motor Passo-a-Passo utilizado

ST8918

Stepper Motor - NEMA 34



OPTIONS



VERSIONS

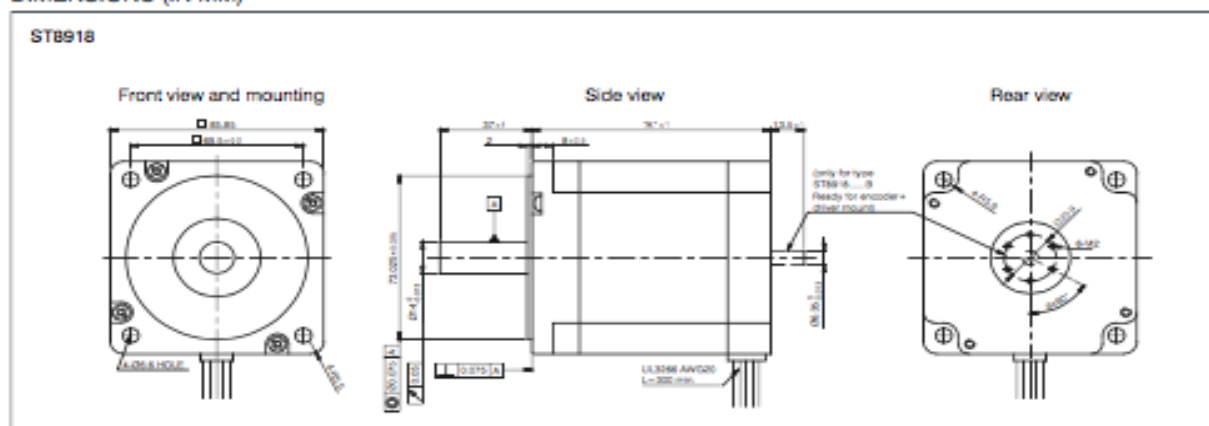
Type	Current per Winding A	Holding Torque Nm	Resistance per Winding Ohm	Inductance per Winding mH	Rotor Inertia gcm ²	Weight kg	Length „A” mm
ST8918S4508	3.18	993.55	0.6	1.9	1000	1.7	65
ST8918M4508	3.18	993.97	0.66	3	1900	2.8	96
ST8918M6708	4.74	993.97	0.45	2.6	1900	2.8	96
ST8918L4508	3.18	933.38	1.1	6.3	3000	3.95	126
ST8918L6708	4.74	933.38	0.54	2.7	3000	3.95	126
ST8918D6708	4.74	1202.06	0.75	4.9	4000	5.4	156

The current and holding torque values refer to bipolar serial wiring. The resistance and inductance values refer to unipolar wiring.

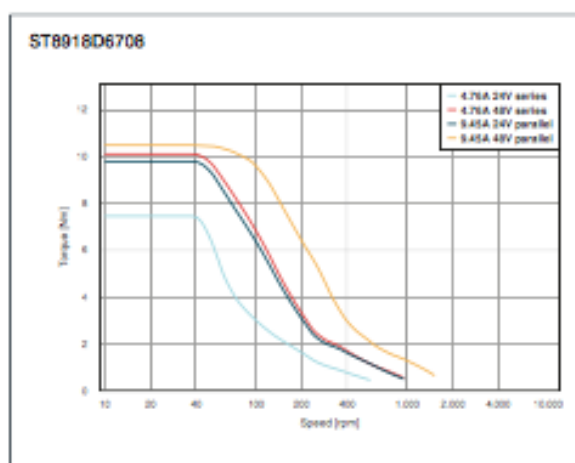
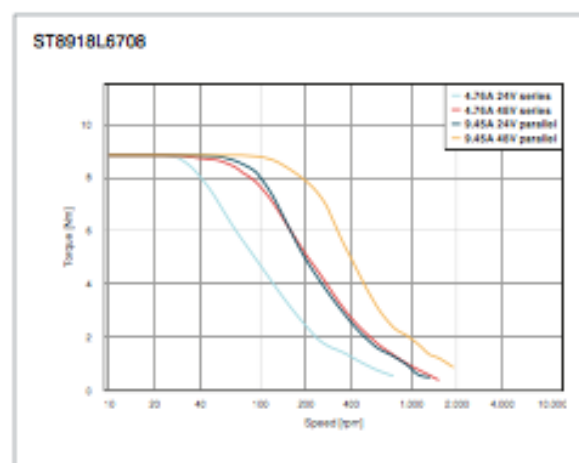
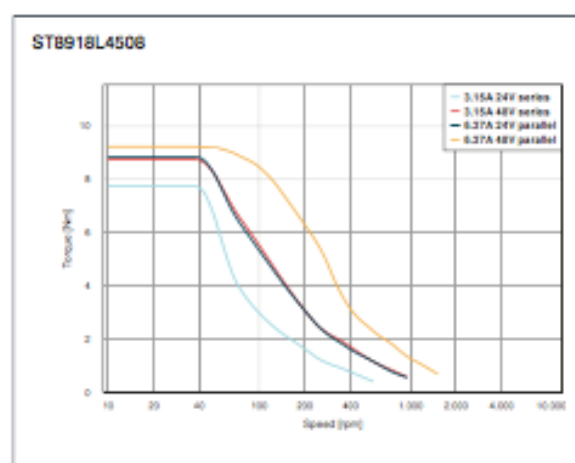
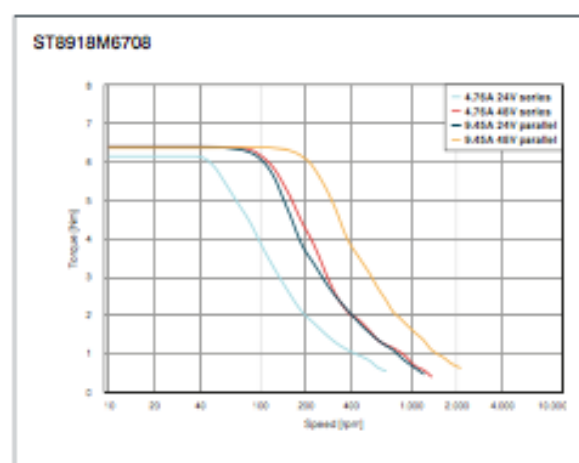
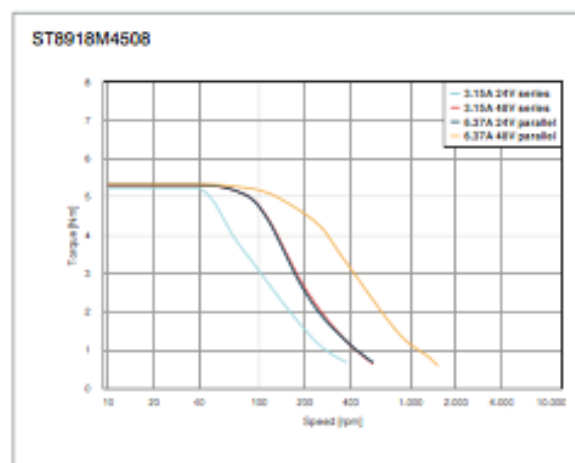
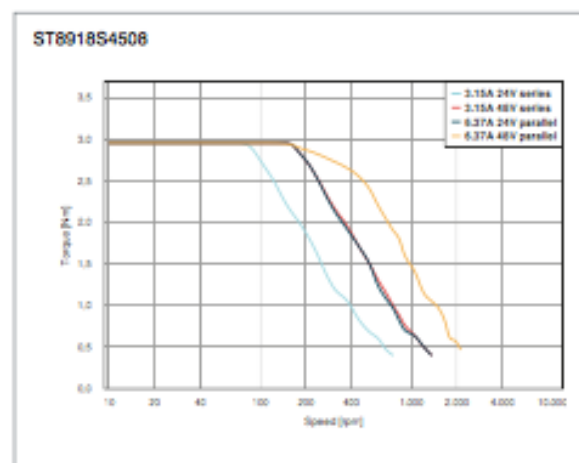
ORDER IDENTIFIER

ST8918S4508-
A = single shaft
B = double shaft

DIMENSIONS (IN MM)



TORQUE CURVES



ANEXO A3- “Data sheet” da Drive utilizada

SMC147-S

Closed-Loop Stepper Motor Controller

SOFTWARE



TECHNICAL DATA

Operating voltage	24 V to 48 VDC
Phase current	Rated current 7.0 A, adjustable up to 10.5 A/phase
Interface	RS485 or CANopen
Operating type	RS485: position, speed, flag position, clock-direction, analog, joystick CANopen: position, homing mode, velocity mode, interpolated position mode, torque mode
Operating mode	1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/32, 1/64, adaptive
Step frequency	0 to 50 kHz in clock-direction mode, 0 to 25 kHz in all other modes
Inputs	6 opto-coupler inputs (5 to 24 V)
Outputs	3 open collector, 30 V/2 A max., 1 output for brake, max. 1.5 A
Position monitoring	Automatic error correction up to 0.9°, only with encoder at RS485
C current reduction	Adjustable 0–100%
Protective circuit	Overvoltage, undervoltage and heat sink temperature > 80°C
Temperature range	0 to + 40°C

VERSIONS

Type	Min. Operating Voltage V	Max. Operating Voltage V	Rated Current A	Suitable for	Interface	Weight kg
SMC/S	12	48	7	Shopper Motors	RS485, CANopen	0.15

ORDER IDENTIFIER



ACCESSORIES

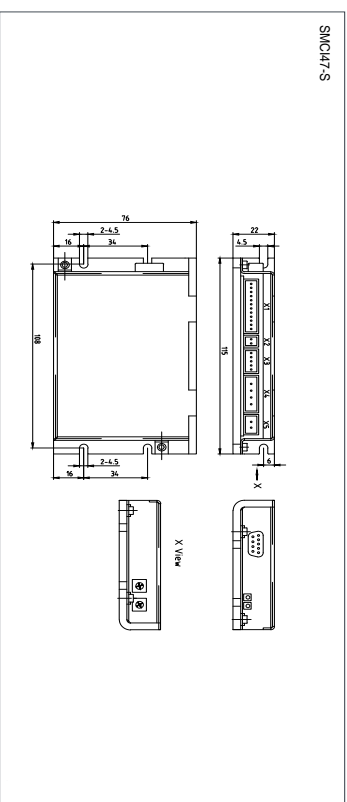


CAUTION



SMC127-S-	Changing Capacitor	We recommend using a backup capacitor of sufficient size to stabilize the operating voltage.
= RS485 Interface	ZK-4700/050	
3 = CANopen Interface	ZK-RS485-RS232 Converter	
	ZK-RS485-USB Converter	
	ZK-SMC1LD	Encoder Cable

DIMENSIONS (IN MM)



ANEXO A4- Programa de Nivelamento do C.M.E.

19-07-2017 15:30 C:\Program Files\MATLAB...\CMElevelling.m 1 of 5

```
%% Initialization

if exist('vidIn')==1 %if video input already exists, clc and clear all to create another

    clear all

end
thresh = 0.10; % Threshold for white detection
vidDevice = imag.VideoDevice('gige', 1, 'Mono8', ... % Acquire input video stream
    'ROI', [500 500 900 1000], ...
    'ReturnedColorSpace', 'rgb');
vidInfo = imaqhwinfo(vidDevice); % Acquire input video property

hblob = vision.BlobAnalysis('AreaOutputPort', false, ... % Set blob analysis handling
    'CentroidOutputPort', true, ...
    'BoundingBoxOutputPort', true, ...
    'MinimumBlobArea', 8, ...
    'OrientationOutputPort', true, ...
    'MaximumCount', 2);

hshapeinsWhiteBox = vision.ShapeInserter('BorderColor', 'Custom', ...
    'CustomBorderColor', [1 0 0]); % Set white box✓

handling
htextins = vision.TextInserter('Text', 'Number of White Object(s): %2d', ... % Set text✓
for number of blobs
    'Location', [7 2], ...
    'Color', [1 1 1], ... // white color
    'Font', 'Courier New', ...
    'FontSize', 12);
htextinsCent = vision.TextInserter('Text', '+ X:%6.2f, Y:%6.2f', ... % set text for✓
centroid
    'LocationSource', 'Input port', ...
    'Color', [1 1 1], ... // white color
    'FontSize', 12);
hVideoIn = vision.VideoPlayer('Name', 'Final Video', ... % Output video player
    'Position', [75 75 vidInfo.MaxWidth+20 vidInfo.✓
MaxHeight+30]);

nFrame = 0; % Frame number initialization

W=0;
% Processing Loop
% intervalo=2000; this is generate graphics
% passo=1;
% t=1;
% x=0;
```


19-07-2017 15:30 C:\Program Files\MATLAB...\CMElevelling.m 2 of 5

```

while(W==0) % c<1 = while C.M.E is not alligned || nFrame<?
    try

        rgbFrame = step(vidDevice); % Acquire single frame
        rgbFrame=imrotate(rgbFrame,-90);
        bwredFrame = im2bw(rgbFrame(:,:,1), thresh); % obtain the white component from red
    layer
        bwgreenFrame = im2bw(rgbFrame(:,:,2), thresh); % obtain the white component from
    green layer
        bwblueFrame = im2bw(rgbFrame(:,:,3), thresh); % obtain the white component from blue
    layer
        binFrame = bwredFrame & bwgreenFrame & bwblueFrame; % get the common region
        binFrame = medfilt2(binFrame, [3 3]); % Filter out the noise by using median filter
        [centroid, bbox,orientation] = step(hblob, binFrame); % Get the centroids and
    bounding boxes of the blobs
        rgbFrame(1:15,1:215,:) = 0; % put a black region on the output stream
        vidIn = step(hshapeinsWhiteBox, rgbFrame, bbox); % Instert the white box
        for object = 1:1:length(bbox(:,1)) % Write the corresponding centroids
            vidIn = step(htextinsCent, vidIn, [centroid(object,1) centroid(object,2)],
[centroid(object,1)-6 centroid(object,2)-9]);

        end
        vidIn = step(htextins, vidIn, uint8(length(bbox(:,1))))); % Count the number of blobs
        step(hVideoIn, vidIn); % Output video stream
        nFrame = nFrame+1;

orientation=(orientation)
centroid=(centroid)
[m,n]=size(centroid)
matrix=isempty(centroid);

if m==1

    display('laser is not being reflected')
    dYreal=dYreal;
    pause(1)

end
if centroid(1,1)<504

    centroid([1 2],:)=centroid([2 1],:); %swap lines

    fixedcentroid=centroid
end

if matrix==0

dXt=centroid(1,1)-centroid(2,1)
dYt=centroid(1,2)-centroid(2,2)

dXreal=dXt*cosd(30) % get the real distance in the X axis

```

```
dYreal=dYt % the value in the Y axis is the same

% x=[x,dYreal]; %draw grafic
% plot(x);
% axis([0,intervalo,-150,150]);
% grid
% t=t+passo;
% drawnow

else if matrix==1

    display( 'Check the laser and the camera')

end

end

%MOTORS CONTROL %

if dXreal<0

if m && n ==1

    pause(2) %wait for the reflected point to be detected again

    display('The reflection of the laser is not being detected')

end

if dYreal>100 %motor 1 at 100 steps

    mls500d

else if dYreal<100 && dYreal>15 %motor 2 at 45 steps

    mls100d

else if dYreal<15 && dYreal>5 %motor 2 at 8 steps

    mls50d

else if dYreal<5 && dYreal>0.26 %motor 2 at 1 step

    j=1; %to make sure that the point has reached this distY before breaking loop
    mls10d

else if dYreal>-15 && dYreal<-5 %motor 1 at 8 steps

    mls50up

else if dYreal>-5 && dYreal<-0.26 %motor 2 at 1 step

    j=1;
    mls10up
```

19-07-2017 15:30 C:\Program Files\MATLAB...\CMElevelling.m 4 of 5

```
else if dYreal<-15 && dYreal>-100 %motor 1 at 45 steps
    mls100up

else if dYreal<-100 %motor 1 at 100 steps
    mls500up

else if (dYreal<0.067 && dYreal>-0.067) && j>0 && encoder==0

    CMEstandby
    break

end

end

end

end

end

end

end

end

end

end

if dXreal>0

if m && n ==1

    pause(2) %wait for the reflected point to be detected again

    display('The reflection of the laser is not being detected')

end

if dYreal>100 %motor 1 at 100 step

    mls500d

else if dYreal<100 && dYreal>15 %motor 1 at 45 steps

    mls100d

else if dYreal<15 && dYreal>5 %motor 2 at 8 steps

    mls50d

else if dYreal<5 && dYreal>0.26 %motor 2 at 1 step

    j=1; %to make sure that the point has reached this distY before breaking loop
    mls10d
```

```
else if dYreal>-15 && dYreal<-5 %motor 1 at 8 steps
    mls50up

else if dYreal>-5 && dYreal<-0.26 %motor 2 at 1 step
    j=1;
    mls10up

else if dYreal<-15 && dYreal>-100 %motor 1 at 45 steps
    mls100up

else if dYreal<-100 %motor 1 at 100 steps
    mls500up

else if (dYreal<0.067 && dYreal>-0.067) && j>0 && encoder==0

    CMEstandby

end

end
end
end
end
end
end
end
end

end
end

catch % catch the error

end

end

%% Clearing Memory
release(hVideoIn); % Release all memory and buffer used
release(vidDevice);
```